Agriculture
Canada

Research Branch
Direction générale de la recherche

Technical Bulletin 1984-9E

Possible effects of climatic change on estimated crop yields in Canada

Canada

84- 4825

The map on the cover has dots representing Agriculture Canada research establishments.

Possible effects of climatic change on estimated crop yields in Canada

A. BOOTSMA
Agrometeorology Section
Land Resource Research Institute
Research Branch

W.J. BLACKBURN, R.B. STEWART, and R.W. MUMA
Resources and Environment Section
Crop Production Division
Regional Development Branch

J. DUMANSKI
Land Use and Evaluation Section
Land Resource Research Institute
Research Branch

LRRI Contribution No. 83-64

Research Branch
Agriculture Canada
1984

Copies of this publication are available from:
Land Resource Research Institute
Research Branch, Agriculture Canada
Ottawa, Ontario
K1A 0C6

Produced by Research Program Service

©Minister of Supply and Services Canada 1984
Cat. No. A54-8/1984-9E
ISBN 0-662-13286-6

Également disponible en français sous le titre
Effets possibles des variations climatiques sur les rendements culturaux estimés au Canada

ABSTRACT

This bulletin describes the effects of selected scenarios of climatic change on estimated dry matter yields for cereal, oilseed, potato, forage (first cut only), and corn crops in Canada. Yields are estimated for each scenario using a generalized crop growth model and modifying the temperature and precipitation input data in relation to the 1941-70 normals period.

Modification of the climatic data reflects the effects of warmer/cooler and drier/wetter climatic conditions for 2 situations: 1) a growing season length similar to the 1941-70 period, and 2) a growing season length deviating from the normals period (i.e. longer or shorter). Analyses of changes in yield resulting from anticipated changes in climate are presented for various agricultural regions in Canada.

RÉSUMÉ

Le présent bulletin décrit l'effet des fluctuations climatiques, selon certains scénarios, sur le rendement en matière sèche estimé pour les céréales, les oléagineux, la pomme de terre, les fourrages (première coupe uniquement) et le maïs au Canada. Pour chacun des scénarios, les auteurs ont évalué les rendements à l'aide d'un modèle général de culture où ils ont introduit des températures et des taux de précipitation modifiés par rapport à ceux de la période de 1941 à 1970, considérés comme données normales.

La modification des données climatiques avait pour but de simuler l'effet des variations temps plus chaud - temps plus froid et temps plus sec - temps plus humide, dans deux cas: 1) avec une période de végétation semblable à la normale de 1941-1970 et 2) une période de végétation différente de la normale (c'est-à -dire, plus longue ou plus courte). Les auteurs ont analysé les variations de rendement qui résulteraient de fluctuations des conditions climatiques dans diverses régions agricoles au Canada.

ACKNOWLEDGEMENTS

Calculations of estimated dry matter yields were made under contract with Sutherland-Schultz Ltd., Kitchener, Ontario (DSS Contract No. 48SZ-01916-2-0760).

We thank G.D.V. Williams, Atmospheric Environment Service, Downsview, and D.W. Stewart, Agriculture Canada, Ottawa for reviewing the bulletin prior to publication.

The assistance of the Graphics Unit, Research Program Services of the Research Branch in the preparation of the diagrams included in this report is gratefully acknowledged.

TABLE OF CONTENTS

	Page
ABSTRACT	iii
ACKNOWLEDGEMENTS	iv
TABLE OF CONTENTS	v
LIST OF FIGURES	vi
LIST OF TABLES	vi
1. INTRODUCTION	1
2. METHODOLOGY	2
2.1 Dry matter yield estimation	2
2.2 Input data	2
2.3 Modification of input data to simulate climatic change	4
3. RESULTS AND DISCUSSION	6
3.1 FIXED growing season length	11
3.1.1 Estimated yields	11
3.1.2 Summary	16
3.2 VARIABLE growing season length	20
3.2.1 Cereal and oilseed yields	20
3.2.2 Potato yields	21
3.2.3 Forage yields	21
3.2.4 Corn yields	21
3.2.5 Summary	22
4. CONCLUSIONS	22
4.1 Effect of a warming trend	22
4.2 Effect of a cooling trend	24
4.3 Effect of changing precipitation	24
REFERENCES	25

LIST OF FIGURES

Figure		Page
1.	Example of two types of temperature change scenarios used: (a) FIXED GSL; (b) VARIABLE GSL.	5
2.	Locations used in the study.	8
3.	Changes in estimated dry matter yields from normal for cereals and oilseeds for FIXED and VARIABLE GSL.	13
4.	Changes in estimated dry matter yields from normal for potatoes for FIXED and VARIABLE GSL.	14
5.	Changes in estimated dry matter yields from normal for forages for FIXED and VARIABLE GSL.	15
6.	Changes in estimated dry matter yields from normal for corn for FIXED and VARIABLE GSL.	17

LIST OF TABLES

Table		Page
1.	Values of crop characteristics used in yield calculations.	3
2.	Climatic scenarios.	7
3.	Climate normals (1941-70) for locations used in the study.	9
4.	Estimated dry matter yields for normal (1941-70) climate.	10
5.	Growing season start, end, length and corn heat units for each temperature change scenario using VARIABLE GSL.	12
6.	Corn Heat Units for each temperature scenario using FIXED GSL.	18
7.	Changes in estimated dry matter yield for ± 1°C change in temperature and $\pm 20\%$ change in precipitation using FIXED GSL.	19
8.	Changes in estimated dry matter yield for ± 1°C change in temperature and $\pm 20\%$ change in precipitation using VARIABLE GSL.	23

1. INTRODUCTION

Agricultural productivity and crop yields are strongly linked to the physical environment in which crops are grown. Variability in climate between years cause crop yields to fluctuate depending on the event, its severity, and abnormality. These year to year variations may be considered as random and generally unpredictable. However, longer term climatic changes which produce distinctly different climatic regimes from the normal may have a significant influence on crop yields and the geographic zones in which crops can be grown. Such a change might result from the increase in carbon dioxide (CO_2) concentration in the atmosphere which is occurring at a fairly rapid rate (Keeling et al., 1976a, 1976b).

The general consensus from the literature is that the most probable effect of an increased CO_2 concentration is an increase in temperature, although the projected magnitude of this change varies depending on the prediction model used (Schneider, 1975; Plass, 1956; Manabe and Wetherald, 1975, 1980; Sellers, 1973). In any event, a temperature rise of around 1°C early in the next century is probably not unrealistic, and this could have major repercussions for agricultural regions in Canada. If rising CO_2 is accompanied by an increase in temperature, the growing season length in various agricultural zones may well be expanded. In fact, it has already been estimated in the United States that a 1°C temperature increase would shift the corn belt 175 km further northeast (Newman, 1980).

In this study, a crop growth model has been used to simulate possible effects on yield of climatic scenarios which represent how the climate may change. The model, developed by F.A.O. (1978) and modified by Stewart (1981) for land evaluation studies in Canada, was used to estimate potential net biomass and dry matter yields. Using this methodology various constraints are applied against the potential values to estimate the agroclimatically attainable or expected net biomass and dry matter yields on a continental scale. Model results are currently available for spring wheat, corn, soybean, phaseolus bean and potato (Dumanski and Stewart, 1981).

This report documents the application of a modified form of the Stewart model for estimating dry matter yields for corn, forage, potato, cereal and oilseed crops for selected climatic scenarios aside from the "normal" case. Normal is defined as the average climate for the 1941-70 period. A climatic scenario is defined as a positive or negative variation in temperature and/or precipitation from normal. The dry matter production data calculated for the 1941-70 normal period are used as a reference for establishing the change in production from either an increase or decrease in temperature or precipitation. Model results can be interpreted, especially those simulating increased temperatures, as possible effects of increasing atmospheric CO_2 concentration.

2. METHODOLOGY

2.1 Dry Matter Yield Estimation

The model applied in this study to compute dry matter biomass production is outlined in detail by Stewart (1981), and hence, only a brief description is given here.

Constraint-free net biomass production, (B_N) or dry matter yield, of the harvestable portion of a crop that can be produced under given climatic conditions in the absence of all yield reducing factors were estimated from the procedure developed by de Wit (1965) as

$$B_N = 0.36\, b_{GM}/(1/N - 0.25\, C_T), \qquad (1)$$

where: b_{GM} is the gross biomass production, N is the number of days required to mature a crop, and C_T is a maintenance respiration coefficient. Crop dry matter yield B_y was then derived as

$$B_y = B_N \times H_I, \qquad (2)$$

where: H_I is the harvest index defined as that fraction of the net biomass production that is economically useful.

Values of B_y computed by eqn. (2) are constraint-free or genetic potential yields. These values, however, do not consider the effect of yield reducing factors such as moisture stress; weeds, pests and diseases; climatic effects on yield components, yield formation, quality of produce; and field workability. These factors should be considered if agronomically attainable yields are to be calculated. For the purposes of this study, values of B_y were corrected by a moisture stress yield reducing factor (MSF) to give values of estimated dry matter yield (B_{ye}):

$$B_{ye} = B_y \times MSF. \qquad (3)$$

The remaining yield reducing factors were considered negligible and ignored. Details of the calculation procedures for C_T, b_{GM}, and MSF are outlined in detail by Stewart (1981) in his eqns. (3, 4 and 16a), respectively. Values of crop characteristics used in this study to derive B_{ye} are listed in Table 1.

2.2 Input Data

The procedures for estimating net biomass and dry matter yields are designed to evaluate the long-term crop production capability on a continental basis using basic climatic information.

Input data required by the model include long-term monthly averages of temperature, precipitation, incoming solar irradiance, windspeed and vapour pressure. These data were either obtained from observation networks

TABLE 1: Values of crop characteristics used in yield calculations.

	Cereals	Potato	Corn	Forage	Oilseeds
GSL	75-110	75-140	90-130	0-75*	75-120
LAI	3.1-5.0	2.5-5.0	3.0-4.0	1.0-5.0	2.3-3.5
H_I	0.11-0.40	0.45-0.60	0.15-0.35	0.80	0.29-0.34
DMMP	0.85	0.325	0.85	1.00	0.85
K_y	1.15	1.10	1.25	1.00	1.25

GSL = growing season length (days)
LAI = leaf area index (dimensionless)
H_I = harvest index (dimensionless)
DMMP = dry matter in the main product (percent)
K_y = crop yield response to moisture stress (dimensionless) (see eqn. 16a, Stewart, 1981).

*First cut only

(Atmospheric Environment Service, Environment Canada) or derived using simple empirical equations.

Normals data representing the 30-year average for the years 1941-70 from climatic stations were converted by computer interpolation to a 1290 equal area grid square system, each grid representing an area 100 km by 100 km. Climatic data for each grid square included precipitation, mean, maximum, and minimum air temperature (reduced to sea level), vapour pressure, windspeed, and incoming solar irradiance. Climatic data for each of 755 soil map units contained in the Soils Map of Canada (Clayton et al., 1977) were then derived from the grid square data. This was accomplished by superimposing the grid square framework onto the 1:5 M Soils of Canada Map and estimating the area of each soil unit contained in each grid square. From this, the basic climatic data for each soil unit was obtained using a simple weighting procedure (Stewart, 1981).

In certain instances the grid square data were considered inadequate for describing the climate of various soil units (ie. mountainous area of British Columbia). In these cases, data for several stations contained in the soil unit were averaged. For soil units containing no climate stations, the grid square data were used. In certain instances, interpolation from station data to the 100 km grid is a limitation in that some microclimates may be averaged out (ie. Annapolis Valley).

2.3 Modification of input data to simulate climatic change

In this study climatic change is simulated by varying temperature and precipitation in two ways. The first, is a climate represented by warmer-cooler/drier-wetter conditions based on the assumption that the growing season length (GSL) is similar to the present climate (ie. the 1941-70 normals) and will not change. This form of climatic change, referred to as "FIXED GSL", is illustrated in Fig. 1 (a) in relation to the 1941-70 normals. To simulate this effect the 1941-70 normals temperature data were modified using the expression:

$$T_I = Tn_I + (Tmax - Tn_I) \sin (3.1416 \times I/GSL), \qquad (4)$$

where: T_I is the modified temperature on day I based on a mean temperature change of T for the growing season; Tn_I is the 1941-70 normal temperature calculated for day I, Tmax is the maximum temperature during the growing season estimated as (Tmaxn + 1.571 ΔT) where Tmaxn is the maximum growing season temperature for the 1941-70 normals period.

The second form of climatic change was simulated by adjusting all monthly temperature data by ΔT, as illustrated in Fig. 1b. This type of change results in a change in growing season length and is referred to as "VARIABLE GSL".

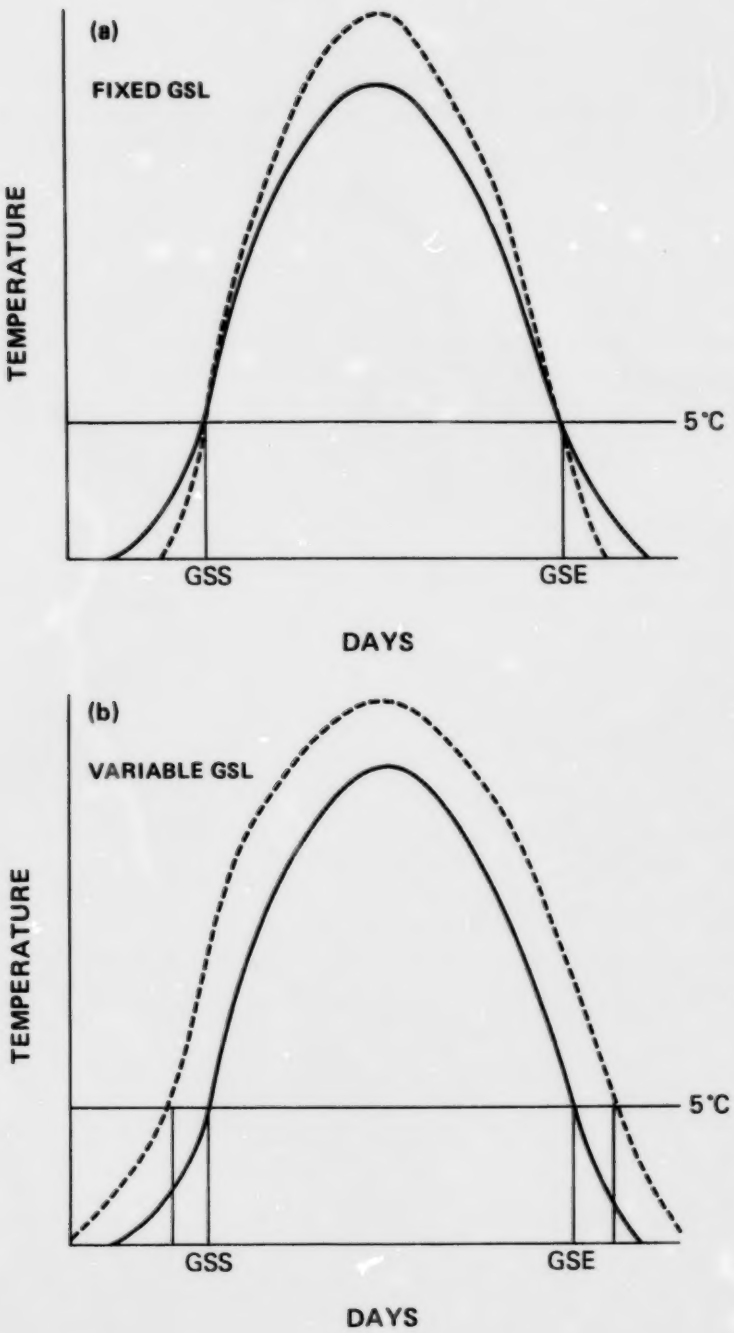

Figure 1. Examples of two types of temperature change scenarios used: (a) FIXED GSL; (b) VARIABLE GSL. (——) denotes normal temperature curve, (---) denotes temperature deviation from normal.

Changes in precipitation were handled identically for both types of climatic change by adjusting the monthly normals. This assumes that no major shifts in precipitation pattern within the growing season occurs and that the change is equally distributed throughtout the growing season. Precipitation is handled in this manner for simplicity since at the present time there is no way of knowing how the precipitation pattern might change within the growing season.

The 1941-70 monthly normals were used as base data. In VARIABLE GSL these data were adjusted to reflect the desired change in temperature and precipitation while all other climate input data were held constant at the normals level. Daily values of all climatic variables except precipitation were generated using the Brooks (1943) sine curve interpolation technique. Monthly precipitation values were converted to weekly values and input on a weekly basis. Mean growing season values were then derived by summing the data between the growing season start (GSS), and end (GSE), and dividing by GSL. The dates for the start and end of the growing season were set by the date the mean minimum air temperature first exceeded 5°C in the the spring and fell below 5°C in the fall.

In FIXED GSL, the monthly and daily data for the 1941-70 normals period were used to derive GSS and GSE for each soil unit. Temperature data between these dates were adjusted using eqn. (4).

For both types of climatic change, anticipated yields are estimated for 22 combinations of temperature (+3°C to -3°C from normal) and precipitation (60% to 140% of normal). The various climatic scenarios are listed in Table 2.

Model computations must be interpreted with the realization that long term climatic normals rather than actual daily information are used. In addition, growing season averages, and bulk crop phenological characteristics are employed, while various crop growth stages and management variations (eg. fertilizer and pesticide use) are omitted.

3. RESULTS AND DISCUSSION

For the purpose of this analysis, seven locations (Fig. 2) across Canada were chosen to determine the effects of different climatic change scenarios on B_{ye} in various climatic regions. Climatic data averaged over the period May 1 to September 30 for each location are listed in Table 3.

Changes in B_{ye} in relation to the 1941-70 normals for the selected scenarios are shown in Fig. 3-6 for cereals, oilseeds, potatoes, forages and corn, for both FIXED and VARIABLE GSL. Absolute values for B_{ye} can be determined by adding or subtracting the change in yield shown on the graphs from the B_{ye} values determined for normal climatic conditions listed in Table 4. Yield trend curves for the different

TABLE 2: Climatic scenarios.

Scenario Number	Temperature Change °C from Normal	Precipitation Change % of Normal
1	0	100
2	+3	60
3	+3	80
4	+3	100
5	+3	120
6	+3	140
7	+2	80
8	+2	100
9	+2	120
10	+1	80
11	+1	100
12	+1	120
13	-1	80
14	-1	100
15	-1	120
16	-2	80
17	-2	100
18	-2	120
19	-3	60
20	-3	80
21	-3	100
22	-3	120
23	-3	140

Figure 2. Locations used in the study.

TABLE 3: Climatic normals (1941-70) for locations used in the study.

Area Number	Location	Climate Normals (May-September) T	P	K	PE
1.	Southern Saskatchewan	13.9	227	20.6	600
2.	Okanagan Valley	15.8	151	20.6	542
3.	Prairie fringe (Prince Albert, Saskatchewan)	13.6	249	18.7	520
4.	Southern Ontario	17.0	371	19.2	517
5.	Peace River region Alberta	12.6	250	18.0	456
6.	Annapolis Valley Nova Scotia	14.4	448	18.5	444
7.	Northern Ontario clay belt	13.3	428	17.7	425

T = mean air temperature (°C)
P = total precipitation (mm)
K = incoming solar irradiance (MJ m^{-2} day^{-1})
PE = total potential evapotranspiration (mm)

TABLE 4: Estimated dry matter yields (t/ha) for normal (1941-70) climate[1].

Location	Cereals	Oilseeds	Potatoes	Forage[2]	Corn[3]
Southern Saskatchewan	1.7	1.6	2.9	4.4	0.0
Okanagan Valley	2.2	1.7	3.8	4.0	3.0
Prairie fringe	2.5	2.5	4.2	4.9	0.0
Southern Ontario	3.6	3.2	6.8	5.2	5.4
Peace River	2.8	3.1	4.8	5.4	0.0
Annapolis Valley	4.1	3.8	7.8	5.3	0.0
Northern Ontario clay belt	3.8	3.7	6.0	6.1	0.0

[1]Dry matter yields are estimated for a maximum growing season length of n days, where n = 110, 120, 140, 75 and 130 days for cereals, oilseeds, potatoes, forage and corn respectively (see Table 5 for GSL values).

[2]Forage yields are applicable to first cut only (GSL = 75 days).

[3]Areas with less than 2500 CHU are indicated as having 0.0 grain corn yields because of inadequate maturity.

locations are reduced to one curve where yield values are within ±0.5 t/ha of the mean value (eg. Fig. 3b).

3.1 FIXED GSL

For FIXED GSL, the values of GSS, GSE and GSL for a given location are not affected by changes in temperature. These parameters are fixed by the computations for the 1941-70 normals period and are listed in Table 5 for VARIABLE GSL with no temperature change applied ($\Delta T = 0°C$). If the GSL exceeded maximum limits set for each crop in Table 1, then the maximum GSL value listed was used in the yield calculations.

3.1.1 Estimated yields. Results for cereals and oilseeds are often combined since the response to climate change is similar for both crops (Fig. 3). The trend is one of declining yield with increasing temperature. Yields in the drier areas (eg. S. Sask. (1), Okanagan V. (2)) are more sensitive to temperature changes than those of more moist areas (eg. Annapolis V. (6), and N. Ont. clay belt (7)) due to increased moisture stress resulting from higher temperatures. Values of B_{ye} for the N. Ont. clay belt (7) are least affected by temperature changes.

For +3°C, yields of cereals and oilseeds are reduced in all areas to the point where a 40% increase in precipitation will not offset the effects of increased moisture stress (Fig. 3D). At -3°C, yield increases range between 1 and 2 t/ha above normal in the drier regions at above normal precipitation levels (Fig. 3E). In the more moist areas, yields are unaffected over the range of precipitation levels investigated.

Yield trends for potatoes (Fig. 4) were very similar to those of cereals and oilseeds. Figure 4 (A, B, and C) indicates a decline in B_{ye} in all areas as temperatures increase above normal values for levels of precipitation from 80% to 120% of normal. Yields in the N. Ont. clay belt (7) are least affected by increased temperature. In S. Sask. (1), Okanagan V. (2), Prairie fringe (3), and S. Ont. (4), yields increased as temperatures dropped below normal. Below normal temperatures had little or no effect on yields in the Peace R. (5), Annapolis V. (6) or the N. Ont. clay belt (7).

Results for forages (Fig. 5) apply to the first cut only (maximum GSL = 75 days). Yield trends for FIXED GSL are similar to those obtained for cereals and oilseeds. For the below normal temperature scenarios, values of B_{ye} were generally within 0.5 t/ha of the normal scenario yields except for S. Sask. (1) and the Okanagan V. (2) where yields increased by about 1 t/ha at -3°C for precipitation amounts 100% of normal or higher. At -3°C, yields were virtually unaffected by changes in precipitation in S. Ont. (4), Annapolis V. (6) and the N. Ont. clay belt (7) (Fig. 5E). In most of the other regions, yields increased gradually from less than 1 t/ha below the no change scenario at 60% of normal precipitation to 0.5 to 1.0 t/ha above normal at 140% of normal precipitation.

TABLE 5: Growing season start (GSS), end (GSE), length (GSL) in days and Corn Heat Units (CHU) for each temperature change scenario using VARIABLE GSL.

		Temperature Change Scenario ΔT (°C)						
Location	Parameter	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
S. Sask.	GSS	20 Jun	13 Jun	6 Jun	29 May	23 May	18 May	13 May
	GSE	22 Aug	28 Aug	1 Sep	6 Sep	12 Sep	17 Sep	22 Sep
	GSL	64	77	88	101	113	123	133
	CHU	1017	1294	1559	1865	2175	2470	2775
Okanagan Valley	GSS	7 Jun	29 May	22 May	14 May	7 May	29 Apr	22 Apr
	GSE	4 Sep	11 Sep	18 Sep	25 Sep	2 Oct	9 Oct	15 Oct
	GSL	90	106	120	135	149	164	177
	CHU	1493	1845	2192	2568	2945	3348	3739
Prairie fringe	GSS	20 Jun	13 Jun	6 Jun	29 May	23 May	18 May	13 May
	GSE	22 Aug	28 Aug	2 Sep	7 Sep	12 Sep	17 Sep	23 Sep
	GSL	64	77	89	102	113	123	134
	CHU	987	1262	1541	1849	2148	2444	2764
S. Ont.	GSS	25 May	19 May	15 May	9 May	4 May	26 Apr	20 Apr
	GSE	27 Sep	3 Oct	8 Oct	13 Oct	19 Oct	24 Oct	2 Nov
	GSL	126	138	147	158	169	182	197
	CHU	2232	2569	2886	3237	3597	3994	4422
Peace R.	GSS	28 Jun	17 Jun	9 Jun	30 May	23 May	17 May	12 May
	GSE	14 Aug	22 Aug	29 Aug	4 Sep	11 Sep	17 Sep	23 Sep
	GSL	47	67	82	98	112	124	135
	CHU	625	958	1260	1596	1931	2257	2583
Annapolis Valley	GSS	13 Jun	6 Jun	30 May	24 May	18 May	12 May	6 May
	GSE	17 Sep	23 Sep	30 Sep	7 Oct	13 Oct	20 Oct	2 Nov
	GSL	97	110	124	137	149	162	181
	CHU	1443	1751	2088	2434	2786	3162	3607
N. Ont. clay belt	GSS	19 Jun	12 Jun	6 Jun	31 May	27 May	22 May	17 May
	GSE	25 Aug	1 Sep	8 Sep	15 Sep	21 Sep	1 Oct	7 Oct
	GSL	68	82	95	108	118	133	144
	CHU	990	1279	1573	1883	2172	2528	2861

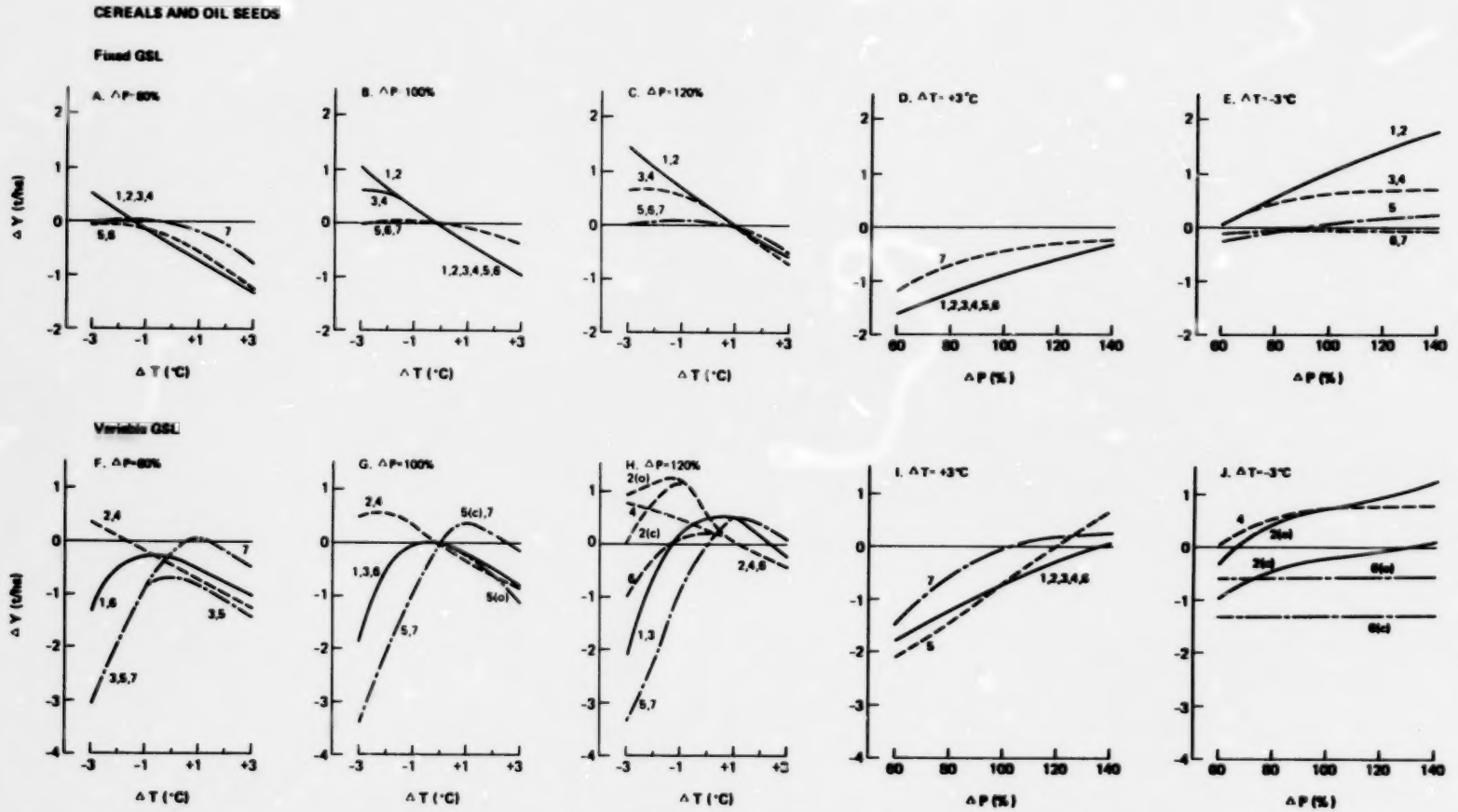

Figure 3. Changes in estimated dry matter yields from normal (ΔY) for cereals (c) and oilseeds (o) for FIXED and VARIABLE GSL. ΔT: change in temperature (°C) from normal; ΔP: percentage of normal precipitation. Locations are (1) S. Sask, (2) Okanagan V., (3) Prairie fringe, (4) S. Ont., (5) Peace R., (6) Annapolis V., (7) N. Ont. clay belt.

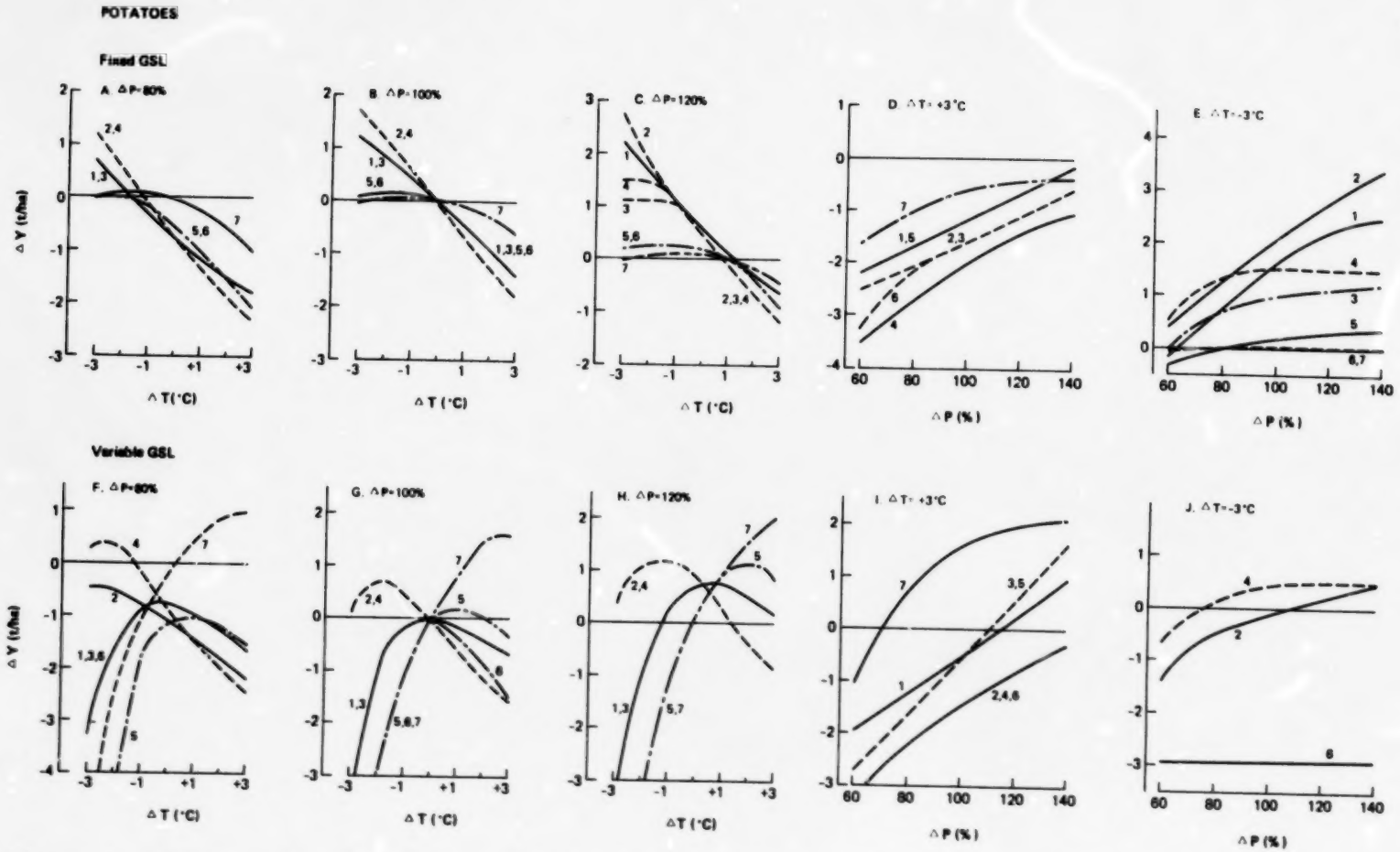

Figure 4. Changes in estimated dry matter yields from normal (ΔY) for potatoes for FIXED and VARIABLE GSL. Locations are as in Figure 3.

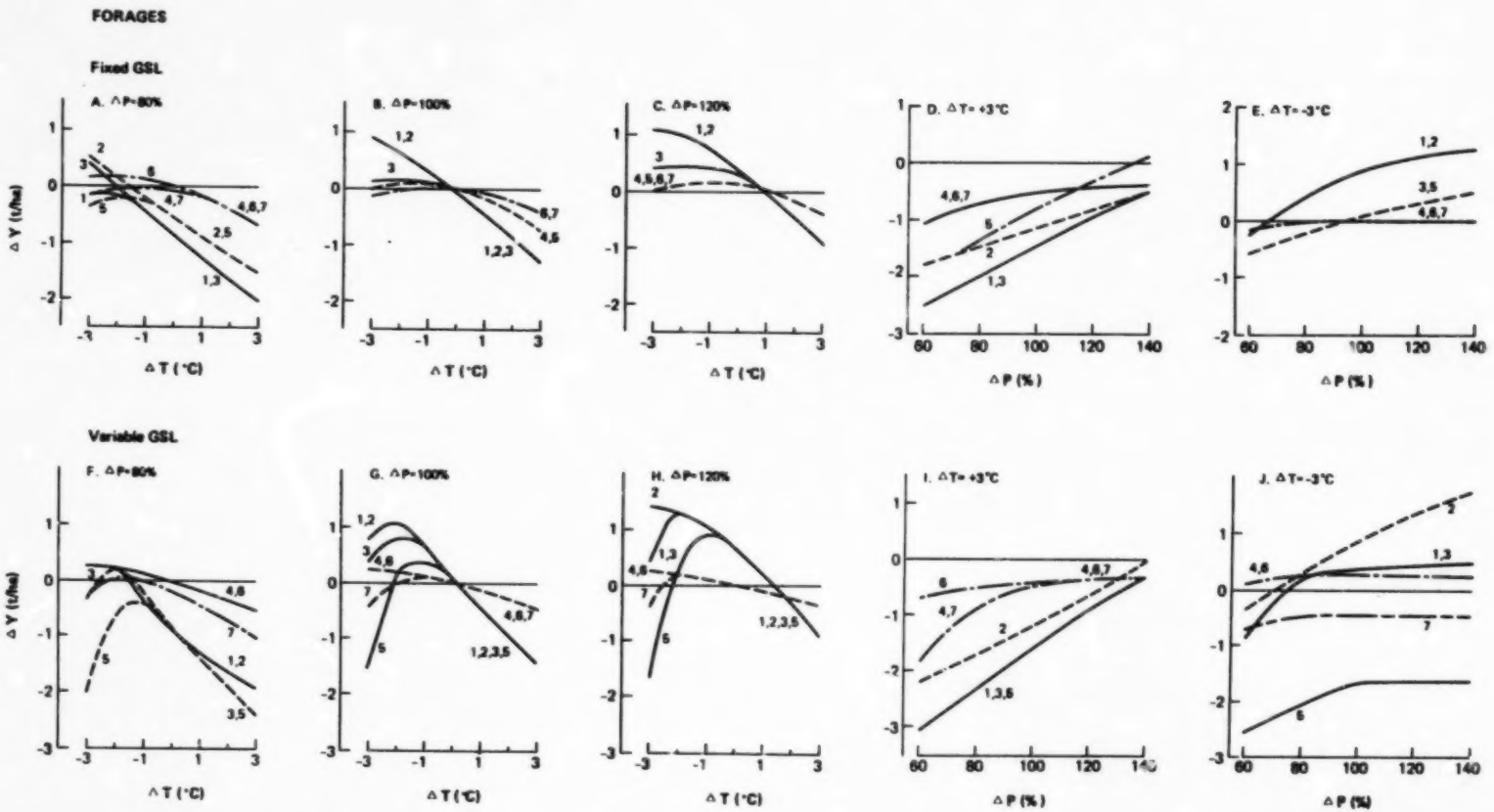

Figure 5. Changes in estimated dry matter yields from normal (ΔY) for forage for FIXED and VARIABLE GSL. Locations are as in Figure 3.

Results for corn (Fig. 6) are only shown for areas where grain corn could reach maturity given the constraint of 2500 Corn Heat Units (CHU) for normal climate (ie. S. Ont. (4) and the Okanagan V. (2)) as shown in Table 4. The available CHU's for each temperature change using FIXED GSL are listed in Table 6. The change in available CHU'S for a 1°C change in temperature from normal ranges from 139 to 243. Below normal temperatures affect the available CHU's more than above normal temperatures. Furthermore, in the short growing season areas (S. Sask, (1), Prairie fringe (3), and Peace R. (5)) CHU's were less sensitive to changes in temperature than in the areas with longer growing season (ie. Okanagan V. (2), S. Ont. (4), and the Annapolis V. (6)). Under the no change scenario estimated yields for the Annapolis V. (6) were zero because CHU's were under-estimated by the climatic interpolation procedure. For all positive temperature changes, the only additional region showing capability is the Annapolis V. (6). For below normal temperatures, S. Ont. (4) is the only region with capability for grain corn production. However, this region's capability ceases at temperatures exceeding -3°C from normal.

The yield trend in corn using FIXED GSL is for lower yields as temperatures rise above normal values, with precipitation levels of 80 and 100% of normal. At precipitation levels 100% and 120% of normal, corn yields in S. Ont. (4) tend to peak at 1941-70 temperature levels. Yields were slightly reduced at both higher and lower temperatures, although the changes are not large (less than 0.25 t/ha per °C temperature change). The greatest decline in corn yields occur when increased temperatures are accompanied by lower precipitation (Fig. 6A). The maximum decline in yield (2.5 t/ha) occurs in the scenario with a +3°C temperature change and precipitation at 60% of normal.

3.1.2 Summary. Of all the climatic scenarios investigated, the ±1°C change in temperature and +20% change in precipitation are probably the most likely scenarios for climatic change over the next few decades. Changes in estimated yield for these scenarios were summarized (Table 7). Yield changes for 80% and 120% of normal precipitation with no change in temperature were estimated by linear interpolation at temperatures of ±1°C since yields were not computed for these scenarios.

A -1°C change in temperature generally increased yields by less than 0.5 t/ha. Almost no yield changes occurred in the cooler and /or wetter areas (Peace R. (5), Annapolis V. (6), N. Ont. clay belt (7)). Yield increases were greatest for potatoes and least for forages. The large negative change in yield for corn in the Okanagan V. (2) results from the total CHU's falling below the 2500 CHU threshold, eliminating production (Table 7).

A temperature increase of +1°C resulted in a decrease in yields mostly in the range of 0.3 to 0.6 t/ha. The N. Ont. clay belt (7) was the only area where +1°C had no effect on yield. The large increase in grain corn yield in the Annapolis V. (6) was due to the 2500 CHU threshold being met.

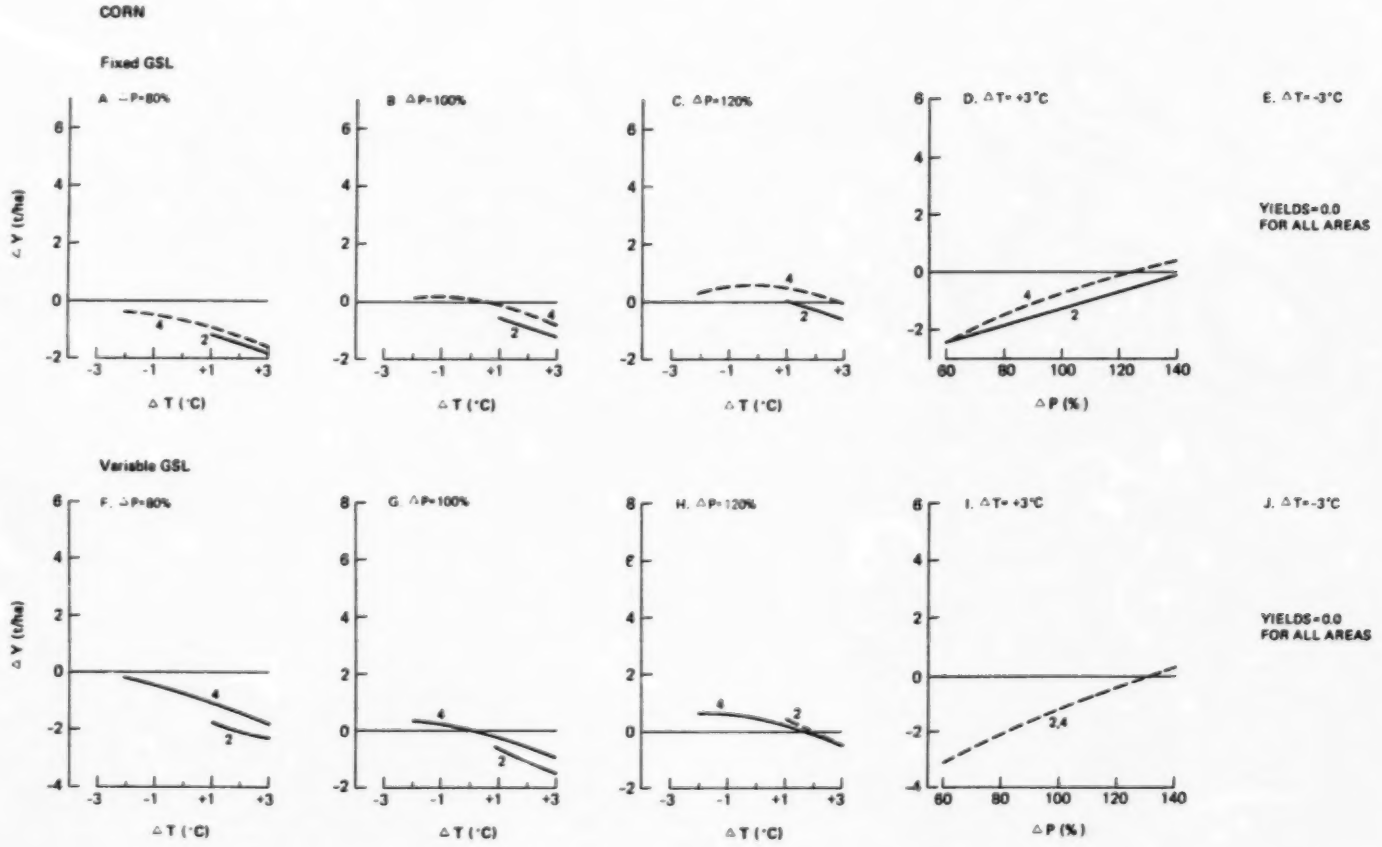

Figure 6. Changes in dry matter yield from normal (ΔY) for corn for FIXED and VARIABLE GSL. Locations are as in Figure 3.

TABLE 6: Corn Heat Units (CHU) for each temperature change scenario using FIXED GSL*.

	Temperature Change Scenario ΔT (°C)						
Location	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
S. Sask.	1395 (-470)	1560 (-305)	1717 (-148)	1865	2004 (+139)	2135 (+270)	2258 (+393)
Okanagan V.	1952 (-616)	2169 (-399)	2374 (-194)	2568	2750 (+182)	2921 (+353)	3081 (+513)
Prairie fringe	1358 (-491)	1530 (-319)	1694 (-155)	1849	1996 (+147)	2134 (+285)	2263 (+414)
S. Ont.	2468 (-768)	2737 (-499)	2993 (-243)	3236	3466 (+230)	3682 (+446)	3885 (+649)
Peace R.	1084 (-512)	1263 (-333)	1434 (-162)	1596	1750 (+154)	1896 (+300)	2034 (+438)
Annapolis V.	1701 (-732)	1956 (-477)	2201 (-232)	2433	2655 (+222)	2864 (+431)	3062 (+629)
N. Ont. clay belt	1332 (-551)	1525 (-358)	1708 (-175)	1883	2048 (+165)	2204 (+321)	2351 (+468)

*Growing season start, end and length for FIXED GSL are identical to the zero temperature change scenario of VARIABLE GSL (Table 4) for all temperature changes.
( ) denotes difference from normal.

TABLE 7: Changes in estimated dry matter yield (ΔB_{ye}) for +1°C change in temperature and ±20% change in precipitation using FIXED GSL*.

Location	ΔYield (t/ha)					ΔYield (t/ha)				
	Ce	O	P	F	Cn	Ce	O	P	F	Cn
	A. ΔT=-1°C P=100%					B. ΔT=+1°C P=100%				
S. Sask.	0.2	0.3	0.4	0.2	-	-0.3	-0.3	-0.4	-0.7	-
Okan. V.	0.2	0.2	0.5	0.2	-3.0	-0.3	-0.4	-0.7	-0.5	-0.6
Prairie f.	0.2	0.3	0.4	0.1	-	-0.4	-0.4	-0.6	-0.5	-
S. Ont.	0.3	0.4	0.7	0.2	0.2	-0.3	-0.3	-0.7	-0.1	-0.2
Peace R.	0.1	0.1	0.1	0.0	-	-0.3	-0.3	-0.5	-0.2	-
Annap. V.	0.1	0.1	0.1	0.0	-	-0.3	-0.3	-0.5	-0.1	5.6
N. Ont. clay belt	0.0	0.0	0.1	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.0	-
	C. P=80% ΔT=0					D. P=120% ΔT=0				
S. Sask.	-0.4	-0.5	-0.6	-0.9	-	0.4	0.4	0.6	0.3	-
Okan. V.	-0.5	-0.5	-0.7	-0.5	-	0.3	0.3	0.5	0.3	-
Prairie f.	-0.5	-0.6	-0.8	-0.8	-	0.3	0.4	0.5	0.2	-
S. Ont	-0.3	-0.4	-0.7	0.0	-0.7	0.2	0.3	0.5	0.0	0.5
Peace R.	-0.4	-0.5	-0.7	-0.5	-	0.1	0.2	0.2	0.3	-
Annap. V.	-0.2	-0.3	-0.5	-0.1	-	0.0	0.0	0.0	0.0	-
N. Ont. clay belt	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-	0.0	0.0	0.0	0.0	-

*Change in yields for precipitation changes at ΔT = 0 were estimated by interpolation from ΔY at ±1°C.

Ce = cereals, O = oilseeds, P = potatoes, F = forage, Cn = corn

A precipitation decrease of 20% reduced yields by 0.3 to 0.8 t/ha for most crops and areas. However, in the N. Ont. clay belt (7) estimated yields were reduced by only 0.1 t/ha.

A precipitation increase of 20% resulted in no significant yield changes in the Annapolis V. (6), and the N. Ont. clay belt (7), but slight increases in yield of 0.6 t/ha or less for all other areas. Potatoes had the largest yield increases.

3.2 VARIABLE GSL

The effects of the temperature change scenarios on GSS, GSE and GSL using VARIABLE GSL are shown in Table 5 for each region selected. On average, the GSS is delayed and the GSE is advanced by about 6-7 days for each 1°C decrease in air temperature, although there are differences for some areas and some temperature scenarios. For example, in the Peace R. (5) area the difference between GSS for the +3°C and +2°C temperature scenarios is 5 days compared to 11 days for the -2°C and -3°C temperature scenarios. The GSL changes 12-15 days on average with a 1°C change in temperature, although it varies from 9 to 20 days for the range of scenarios selected. Temperature changes had the greatest effect on GSL for the Okanagan V. (2) and the Peace R. (5) (averaging 14.5 days/°C) and the least effect for S. Sask. (1), S. Ont. (4) and the Prairie fringe (3) areas (averaging approximately 11.7 days/°C).

The changes in growing season length resulting from changes in temperature have a significant effect on estimates of dry matter yield, particularly in those areas which already have marginal growing seasons (eg. the Peace R. (5) and the N. Ont. clay belt (7)).

It should be noted that the parameters GSS, GSE and GSL in Table 5 are based on the climatic data for each location. When calculating yields, a maximum limit was set to the GSL for each crop as shown in Table 1. The climatic GSL was used in the yield model unless the GSL exceeded these limits.

3.2.1 Cereal and oilseed yields. Decreased air temperature resulted in a sharp decline in yields of cereals and oilseeds in S. Sask. (1), Prairie fringe (3), Peace R. (5) and the N. Ont. clay belt (7) (Fig. 3F, G and H). The sharp decline in B_{ye} can partly be attributed to a significant shortening in GSL. In the warmer climates of S. Ont. (4) and the Okanagan V. (2), B_{ye} values tend to increase above normal values as temperatures fall below normal. In these areas the positive impact on estimated yield can be attributed to reduced moisture stress at cooler temperatures given no change in precipitation.

For above normal temperatures and no change in precipitation, yields decline below normal in all areas except the N. Ont. clay belt (7). Results indicate that increased moisture stress at higher temperatures has a greater negative influence on estimated yield that the positive effect of a

longer growing season. In the shorter growing season areas (eg. Prairie fringe (3), Peace R. (5), N. Ont. clay belt (7)), yields peak near the 0 to +1°C temperature change at precipitation amounts ranging from 80% to 120% of normal. In the longer growing season areas (eg. Okanagan V. (2), S. Ont. (4)) the peak estimated yields were generally reached at negative temperature changes of -1 or -2°C (Fig. 3G and H) or not at all (Fig. 3F).

The negative effect of a +3°C temperature change on yield is entirely offset by precipitation increases of 40% above normal (Fig. 3I). For the -3°C temperature change scenario, no yields are indicated for S. Sask. (1), Prairie fringe (3), Peace R. (5), and the N. Ont. clay belt (7).

3.2.2 Potato yields. VARIABLE GSL predicts a sharp drop in B_{ye} of potatoes as temperatures decrease below normal values (Fig. 4) for all areas except the warmest regions (Okanagan V. (2) and S. Ont. (4)). Trends were very similar to those for cereals and oilseeds although the magnitude of the changes in yield were considerably greater. The sharp decline in yield is primarily attributed to the change in growing season length. Peak yields occurred between the 0 to +1°C temperature change except for the N. Ont. clay belt (7) where B_{ye} continued to increase as temperatures were increased by up to +3°C.

At temperature changes of -3°C, only the Okanagan V. (2), S. Ont. (4), and the Annapolis V. (6) indicated some yield potential (Fig. 4J), and only the warmest regions (Okanagan V. (2) and S. Ont. (4)) responded to changes in precipitation.

3.2.3 Forage yields. Changes in B_{ye} for forage tend to peak in most regions at temperatures of -2°C or more below normal (Fig. 5F, G and H), although changes in yields were considerably less than for cereals, oilseeds and potatoes. At below normal temperatures, yields tend to remain above normal for precipitation amounts 100% and 120% of normal. The reduced effect of low temperatures on forage yields in comparison to other crops is likely due to the relatively short growing season requirements (maximum 75 days) for the first cut of forages.

The response of yield to increasing precipitation (Fig. 5I and J) was similar to other crops. Yield responses to precipitation changes for S. Sask. (1), Prairie fringe (3), S. Ont. (4), Peace R. (5) and N. Ont. clay belt (7) were greater at high temperatures (+3°C) than low temperatures (-3°C). Yields were virtually unaffected by changes in precipitation at a temperature change of -3°C in the wettest areas (S. Ont. (4), Annapolis V. (6), N. Ont. clay belt (7)). The Okanagan V. (2) was the only region where yields continued to increase as precipitation amounts increased to 140% of normal at -3°C.

3.2.4 Corn yields. Table 5 indicates the available CHU for each temperature change scenario. On average, a 1°C temperature change results in a change of about 300-365 CHU's. Changes in CHU's tend to be somewhat

greater for above normal temperatures and warmer areas than for below normal temperatures and cooler areas. With the assumption that grain corn can only mature in areas with an average of 2500 or more available CHU's, then a 1°C decrease in mean temperature would eliminate the potential for growing grain corn from all areas except S. Ont. (4) as shown in Table 6. Conversely, an increase in mean temperature of 1°C would expand grain corn production capability to the Annapolis V. (6); 2°C to N. Ont. clay belt (7); 3°C to the remaining areas (S. Sask. (1), Prairie fringe (3), Peace R. (5)). As mentioned earlier, the Annapolis V. (6) is indicated as having no potential for grain corn under normal climate conditions since the available CHU's in that area are slightly underestimated by the 100 km grid square data base.

Yield trends for corn are shown in Fig. 6. Yield trends are very similar to FIXED GSL. The negative effect of a +3°C increase in temperature on yield was not offset until precipitation increased to greater than 120% of normal. Corn yields decrease as temperatures increase due to higher moisture stress. This drop in yield occurs because GSL is set at a constant maximum of 130 days. If GSL was allowed to increase with warming to simulate longer growing season varieties, yields would likely increase.

3.2.5 Summary. A change in temperature of -1°C decreased yields for most crops (except forages) in the cool, short growing season areas (Table 8). Cereal and potato yields in these areas (Peace R. (5), N. Ont. clay belt (7)) were reduced by 1 t/ha or more. In warmer areas, (ie. Okanagan V. (2)) yields increased by up to 0.5 t/ha.

A +1°C temperature increase caused yields to be reduced generally by 0.5 t/ha or less. In the coolest areas (Peace R. (5), N. Ont. clay belt (7)) yields increased for some crops (cereals, potatoes) although rarely more than 0.5 t/ha.

A 20% decrease in precipitation caused yields to be reduced by more than 1 t/ha in some cases (eg. potatoes in the Okanagan V. (2), Prairie fringe (3), and the Peace R. (5)).

A precipitation increase of 20% resulted in greater yields in the drier/warmer areas (S. Sask. (1), Okanagan V. (2), Prairie fringe (3), N. Ont. clay belt (7)) but had a negative or no significant effect on yield in most cases for the Peace R. (5), Annapolis V. (6), and the N. Ont. clay belt (7).

4. CONCLUSIONS

4.1 Effect of a warming trend

Results from this study suggest that a rise in temperature with no change in precipitation would lower crop yields in most areas of Canada for the crops studied. Reduced yields are due to increased moisture stress at

TABLE 8: Changes in estimated dry matter yield (ΔB_{ye}) for $\pm$1°C change in temperature and $\pm$20% change in precipitation using VARIABLE GSL*.

Location	ΔYield (t/ha)					ΔYield (t/ha)				
	Ce	O	P	F	Cn	Ce	O	P	F	Cn
	A. ΔT=-1°C P=100%					B. ΔT=+1°C P=100%				
S. Sask.	-0.3	0.3	-0.1	0.7	-	0.1	-0.2	-0.1	-0.5	-
Okan. V.	0.5	0.5	0.3	0.5	-3.0	-0.4	-0.4	-0.5	-0.5	-0.6
Prairie f.	-0.4	0.2	-0.2	0.6	-	0.1	-0.3	-0.2	-0.5	-
S. Ont.	0.3	0.3	0.2	0.1	0.3	-0.3	-0.3	-0.6	-0.1	-0.3
Peace R.	-1.3	-0.5	-1.5	0.4	-	0.4	-0.2	0.2	-0.4	-
Annap. V.	0.1	0.1	-0.8	0.1	-	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	5.4
N. Ont. clay belt	-1.0	-0.4	-1.0	0.0	-	0.5	0.3	0.7	-0.2	-
	C. P=80% ΔT=0					D. P=120% ΔT=0				
S. Sask.	-0.5	-0.6	-0.8	-0.8	-	0.4	0.5	0.6	0.8	-
Okan. V.	-0.6	-0.6	-1.1	-0.8	-	0.7	0.8	0.9	0.7	-
Prairie f.	-0.8	-0.2	-1.1	-0.8	-	0.3	0.4	0.5	0.6	-
S. Ont.	-0.4	-0.4	-0.8	-0.1	-0.7	0.2	0.3	0.5	0.1	0.5
Peace R.	-1.0	-1.0	-1.4	-0.8	-	-0.1	0.0	-0.1	0.5	-
Annap. V.	-0.2	-0.2	-0.8	0.0	-	0.0	0.0	-0.3	0.0	-
N. Ont. clay belt	-0.4	-0.2	-0.4	-0.3	-	-0.3	-0.1	-0.2	-0.1	-

*Change in yields for precipitation changes at ΔT =0 were estimated by interpolation from ΔY at $\pm$1°C.

Ce = cereals, O = oilseeds, P = potatoes, F = forage, Cn = corn

higher temperatures. The negative effect of warming temperatures on yield is enhanced if accompanied by a decrease in precipitation and reduced if precipitation increases to above normal values.

A few exceptions to the above yield trends were noted. For example, potato yields in the N. Ont. clay belt (7) increased with longer GSL caused by an increase in temperature (Table 5, Fig. 4). For corn, land areas suitable for production could expand northward in Ontario by 60 to 100 km for each 1°C rise in temperature, subject to soil limitations. Similarly, the land areas suitable for grain corn production would expand in other humid regions of Canada which presently have insufficient heat units for present-day hybrids to reach maturity.

4.2 Effect of a cooling trend

Results show varying effects on estimated yield due to cooling. If GSL does not change, estimated yields of all crops (except corn) increase in the drier/warmer areas at normal precipitation levels. This effect is likely due to a reduction in moisture stress. Conversely, in the cooler/wetter areas there is little or no effect on estimated yield.

A reduced GSL results in large reductions of the estimated yield for all crops except the first cut of forages, and in all areas except those with long GSL's (ie. Okanagan V. (2) and S. Ont. (4)).

Assuming a minimum requirement of 2500 CHU's, a 1°C decrease in temperature accompanied by a shorter GSL would eliminate grain corn in all areas except in S. Ont. (4). A 3°C decrease in temperature would eliminate the potential for grain corn from all areas of Canada.

4.3 Effect of changing precipitation

Yields tend to increase as precipitation increases. Yields typically change by 0.5 to 0.8 t/ha for a 20% change in precipitation at normal temperatures. At 3°C below normal, yields are significantly affected by precipitation changes only in drier areas(ie. S. Sask. (1), Okanagan V. (2)). At temperatures above normal, yield is significantly influenced by precipitation in all areas although the effect is greatest in the driest regions.

REFERENCES

Brooks, C.E.P., 1943. Interpolation tables for daily values of meteorological elements. Q.J.R. Meteorol. Soc., 69(300), 160-162.

Clayton, J.S., W.A. Ehrlich, D.B. Cann, J.H. Day and I.B. Marshall, 1977. Soils of Canada. Vols. 1 and 2. Research Branch, Canada Deparment of Agriculture, Ottawa, 239 p.

Dumanski, J. and R.B. Stewart, 1981. Crop Production Potentials for Land Evaluation in Canada. Research Branch, Agriculture Canada, 80 p.

F.A.O., 1978. Report on the Agro-ecological zones project: Vol. 1. Methodology and results for Africa. World Soil Resources Report 48, F.A.O., Rome. 158 p.

Keeling, C.D., J.A,. Adams Jr., C.A. Ekdahl Jr. and P.R. Guenther, 1976a. Atmospheric carbon dioxide variations at the South Pole. Tellus, 28(6), 552-564.

Keeling, C.D., R.B. Bacastow, A.E. Bainbridge, C.A. Ekdahl Jr., P.R. Guenther and L.S. Waterman, 1976b. Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii. Tellus, 28(6) 538-551.

Manabe, S. and R.T. Wetherald, 1975. The effects of doubling the CO_2 concentration on the climate of a general circulation model. J. Atmos. Sci., 32, 3-15

Manabe, S. and R.W. Wetherald, 1980. On the distribution of climate change resulting from an increase in CO_2 content of the atmosphere. J. Atmos. Sci., 37, 99-118.

Newman, J.E., 1980. Climate change impacts on the growing season of the North American corn belt. Biometeorology 7, Part 2:128-142.

Plass, G.N., 1956. Effect of carbon dioxide variations on climate. Am. J. Phys., 24, 376-387.

Schneider, S.H., 1975. On the carbon dioxide-climate confusion. J. Atmos. Sci., 32, 2060-2065.

Seller, W.D., 1973. A new global climatic model. J. Appl. Meteorol., 12(2), 241-254.

Sionit, N., H. Hellmers and B.R. Strain, 1980. Growth and yield of wheat under CO_2 enrichment and water stress. Crop Sci., 20, 687-690.

Stewart, R.B., 1981. Modeling methodology for assessing crop production potentials in Canada. Tech. Bull. 96, Research Branch, Agriculture Canada, Ottawa, 29 p.

Wit, C.T. de, 1965. Photosynthesis of leaf canopies. Agricultural Research Report 663. Centre for Agricultural Publications and Documentation, Wageningen, 57 p.

Agriculture Canada

Research Branch | Direction générale de la recherche

Bulletin technique 1984-9F

Effets possibles des variations climatiques sur les rendements culturaux estimés au Canada

Canada

Sur la couverture, les points sur la carte indiquent
les établissements de recherche d'Agriculture Canada.

Effets possibles des variations climatiques sur les rendements culturaux estimés au Canada

A. BOOTSMA
Section d'agrométéorologie
Institut de recherche sur les terres
Direction générale de la recherche

W.J. BLACKBURN, R.B. STEWART et R.W. MUMA
Section des ressources et de l'environnement
Division de la production végétale
Direction générale du développement régional

J. DUMANSKI
Section de l'aménagement des terres et de l'évaluation
Institut de recherche sur les terres
Direction générale de la recherche

Contribution n° 83-64 de l'I.R.T.

Direction générale de la recherche
Agriculture Canada
1984

On peut se procurer des exemplaires
de cette publication à l'adresse suivante:
Institut de recherche sur les terres
Direction générale de la recherche
Agriculture Canada
Ottawa (Ontario)
K1A 0C6

Production du Service aux programmes de recherche

©Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1984
N° de cat. A54-8/1984-9F
ISBN 0-662-92679-X

Also available in English under the title
Possible effects of climatic change on estimated crop yields in Canada.

RÉSUMÉ

Le présent bulletin décrit l'effet des fluctuations climatiques, selon certains scénarios, sur le rendement en matière sèche estimé pour les céréales, les oléagineux, la pomme de terre, les fourrages (première coupe uniquement) et le maïs au Canada. Pour chacun des scénarios, les auteurs ont évalué les rendements à l'aide d'un modèle général de culture où ils ont introduit des températures et des taux de précipitation modifiés par rapport à ceux de la période de 1941 à 1970, considérés comme données normales.

La modification des données climatiques avait pour but de simuler l'effet des variations temps plus chaud - temps plus froid et temps plus sec - temps plus humide, dans deux cas: 1) avec une période de végétation semblable à la normale de 1941-1970 et 2) une période de végétation différente de la normale (c'est-à-dire, plus longue ou plus courte). Les auteurs ont analysé les variations de rendement qui résulteraient de fluctuations des conditions climatiques dans diverses régions agricoles au Canada.

ABSTRACT

This bulletin describes the effects of selected scenarios of climatic change on estimated dry matter yeilds for cereal, oilseed, potato, forage (first cut only), and corn crops in Canada. Yields are estimated for each scenario using a generalized crop growth model and modifying the temperature and precipitation input data in relation to the 1941-70 normals period.

Modification of the climatic data reflects the effects of warmer/cooler and drier/wetter climatic conditions for 2 situations: 1) a growing season length similar to the 1941-70 period, and 2) a growing season length deviating from the normals period (i.e. longer or shorter). Analyses of changes in yield resulting from anticipated changes in climate are presented for various agricultural regions in Canada.

REMERCIEMENTS

Sutherland-Schultz Ltd. de Kitchener, en Ontario, a procédé au calcul des rendements estimés en matière sèche au titre du contrat MAS nº 48SZ-01916-2-0760).

Les auteurs tiennent à remercier G.D.V. Williams, du Service de l'environnement atmosphérique, de Downsview et D.W. Stewart du ministère de l'Agriculture du Canada, à Ottawa, qui ont révisé le bulletin avant sa publication.

Ils remercient également le personnel de la Section des arts graphiques du Service des programmes de recherche de la Direction générale qui a préparé les diagrammes figurant dans le présent bulletin.

TABLE DES MATIERES

	Page
RESUME	iii
REMERCIEMENTS	iv
TABLES DES MATIERES	v
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX	vi
1. INTRODUCTION	1
2. METHODOLOGIE	2
2.1 Estimation du rendement en matière sèche	2
2.2 Données de départ	2
2.3 Modification des données de départ pour simuler les fluctuations climatiques	4
3. RESULTATS ET DISCUSSIONS	8
3.1 Période de végétation fixe	8
3.1.1 Rendements estimés	8
3.1.2 Résumé	19
3.2 Période de végétation variable	19
3.2.1 Rendement des céréales et des oléagineux	21
3.2.2 Rendement de la pomme de terre	22
3.2.3 Rendement des fourrages	22
3.2.4 Rendement du mais	23
3.2.5 Résumé	23
4. CONCLUSIONS	25
4.1 Effet d'un réchauffement	25
4.2 Effet d'un refroidissement	25
4.3 Effet d'une variation du taux de précipitation	26
BIBLIOGRAPHIE	27

LISTE DE FIGURES

Figure		Page
1.	Exemple de deux types de scénarios utilisés pour les fluctuations de température: (a) PERIODE DE VEGETATION FIXE; (b) PERIODE DE VEGETATION VARIABLE.	5
2.	Régions couvertes par l'étude.	9
3.	Variations des rendements estimés en matière sèche par rapport à la normale pour les céréales et les oléagineux, avec une période de végétation fixe et une période variable.	13
4.	Variations des rendements estimés en matière sèche par rapport à la normale pour la pomme de terre avec une période de végétation fixe et une période variable.	14
5.	Variations des rendements estimés en matière sèche par rapport à la normale pour les fourrages, avec une période de végétation fixe et une période variable.	16
6.	Variations des rendements estimés en matière sèche par rapport à la normale pour le mais, avec une période de végétation fixe et une période variable.	17

LISTE DE TABLEAUX

Tableau		Page
1.	Caractéristiques végétales utilisées dans le calcul du rendement.	3
2.	Scénarios climatiques.	7
3.	Données climatiques normales (1941-1970) pour les régions étudiées.	10
4.	Rendement en matière sèche estimé pour les conditions climatiques normales (1941-1970).	11
5.	Début, fin, durée de la période de végétation, nombre d'unités thermiques mais pour chaque scénario de fluctuation de température, avec une période de végétation variable.	12
6.	Unités thermiques mais pour chaque scénario de fluctuation de température avec une période de végétation fixe.	18
7.	Variations du rendement estimé en matière sèche pour chaque variation de +1°C de la température et de +20 % du taux de précipitation, avec une période de végétation fixe.	20
8.	Variations du rendement estimé en matière sèche pour chaque variation de +1°C de température et de +20 % du taux de précipitation, avec une période de végétation variable.	24

1. INTRODUCTION

La productivité agricole et le rendement des cultures sont étroitement liés à l'environnement physique où les plantes sont cultivées. Les fluctuations climatiques d'une année à l'autre entraînent une variations des rendements, qui dépend de la nature du phénomène, de sa gravité et du fait qu'il soit exceptionnel. Ces changements de climat peuvent être considérés comme aléatoires et habituellement imprévisibles. Toutefois, les variations à plus long terme, qui singularisent un régime climatique par rapport à la normale, peuvent avoir une influence considérable sur le rendement cultural et sur les zones géographiques aptes a la culture. Un tel changement pourrait résulter de l'augmentation de la concentration du dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère, qui progresse à un rythme relativement élevé (Keeling et al., 1976a, 1976b).

Les auteurs d'écrits sur le sujet pensent, en général, que l'effet le plus probable d'une augmentation de la teneur en CO_2 serait une élévation de la température, bien que l'estimation qu'ils en donnent varie selon le modèle de prévision utilisé (Schneider, 1975; Plass, 1956; Manabe et Wetherald, 1975, 1980; Sellers, 1973). De toute façon, il n'est pas impensable que la température augmente d'environ 1 °C au début du siècle prochain, ce qui pourrait avoir des répercussions majeures sur la situation dans les régions agricoles du Canada. Une élévation de température, accompagnant la hausse de la concentration du CO_2, pourrait entraîner une forte prolongation de la période de végétation. En fait, on a déjà évalué aux Etats-Unis qu'avec une hausse de 1 °C de la température, la ceinture de mais s'étendrait sur 175 km de plus vers le nord-est (Newman, 1980).

Les auteurs du présent travail ont étudié, à l'aide d'un modèle cultural les variations possibles du rendement avec divers scénarios de fluctuations climatiques. Le modèle, créé par la F.A.O. (1978) et modifié par Stewart (1981) pour des travaux sur l'évaluation des terres au Canada, a servi à estimer les rendements possibles en biomasse nette et en matière sèche. Dans cette méthode, diverses contraintes sont appliquées aux données possibles pour évaluer, en fonction des conditions agro-climatiques, les rendements en biomasse nette et en matière sèche, accessibles ou prévisibles, à l'échelle continentale. Des résultats ont été obtenus avec ce modèle pour le blé de printemps, le mais, le soja, le haricot et la pomme de terre (Dumanski et Stewart, 1981).

Les auteurs du présent rapport décrivent l'application d'une forme modifiée du modèle de Stewart à l'estimation du rendement en matière sèche du mais, de fourrages, de la pomme de terre, de céréales et d'aoléagineux, dans des scénarios climatiques choisis s'écartant de la normale. Le climat considéré comme normal est celui qui a prévalu, en moyenne, entre 1941 et 1970. Un scénario climatique est un modèle où les auteurs ont appliqué une variation positive ou négative à la température ou au taux de précipitation par rapport à la normale. La quantité de matière sèche produite, calculée pour la période normale de 1941-1970, a servi de donnée repère pour le calcul de la variation de production résultant d'une hausse ou d'une baisse de la température ou du taux de précipitation. Les résultats obtenus avec le modèle, en particulier avec une augmentation éventuelle des températures, peuvent être considérés comme les effets possibles d'une hausse de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère.

2. METHODOLOGIE

2.1 Estimation du rendement en matière sèche

Le modèle utilisé pour le calcul de la production de matière sèche, ne sera que brièvement décrit dans ce rapport, car Stewart (1981) en fait une présentation détaillée.

La biomasse nette (B_N), en l'absence de contraintes, ou le rendement en matière sèche, de la portion récoltable d'une culture, en l'absence de facteurs climatiques réduisant le rendement, a été calculée à l'aide d'une équation établie par de Wit (1965):

$$B_N = 0.36\ b_{GM}/(1/N - 0.25\ C_T), \qquad (1)$$

où: b_{GM} représente la production de biomasse brute, N, le nombre de jours mis par la culture pour atteindre la maturité et C_T, un coefficient d'entretien respiratoire. Le rendement en matière sèche, B_y, a été alors déduit par la formule

$$B_y = B_N \times H_I, \qquad (2)$$

où: H_I est l'indice de récolte, défini comme la fraction économiquement utile de la biomasse nette produite.

Les valeurs de B_y calculées à l'aide de l'équation (2) sont des rendements en l'absence de contraintes, ou des rendements attribuables au potentiel génétique. Toutefois, ces valeurs ne prennent pas en compte l'effet des facteurs qui réduisent le rendement, comme le stress hydrique, les mauvaises herbes, les parasites et les maladies; l'effect du climat sur les éléments de rendement, la formation du rendement, la qualité du produit et la facilité de labourage du sol. Ces facteurs devront être considérés dans le calcul des rendements possibles dans certaines conditions agronomiques. Dans la présente étude, les valeurs de B_y ont été corrigés par un facteur de stress hydrique (FSH) pour calculer le rendement en matière sèche (B_{ye}):

$$B_{ye} = B_y \times FSH \qquad (3)$$

Les autres facteurs réduisant le rendement, jugés négligeables, ont été ignorés. Stewart (1981) explique en détail le calcul de C_T; b_{GM} et FSH avec ses équations 3, 4 et 16a, respectivement. Le tableau 1 présente les caractéristiques culturales utilisées dans la présente étude pour trouver B_{ye}.

2.2 Données de départ

Dans les méthodes d'estimation de la biomasse nette et du rendement en matière sèche, les possibilités de production à long terme, à l'échelle continentale, sont évaluées à partir de données climatiques de base.

TABLEAU 1: Caractéristiques végétales utilisées dans le calcul du rendement

	Céréales	Pomme de terre	Mais	Fourrages	Oléagineux
PV	75-110	75-140	90-130	0-75*	75-120
IF	3,1-5,0	2,5-5,0	3,0-4,0	1,0-5,0	2,3-3,5
H_I	0,11-0,40	0,45-0,60	0,15-0,35	0,80	0,29-0,34
MSPP	0,85	0,325	0,85	1,00	0,85
K_y	1,15	1,10	1,25	1,00	1,25

PV = Durée de la période de végétation (jours)
IF = Indice foliaire (sans unité)
H_I = Indice de récolte (sans unité)
MSPP = Matière sèche dans le produit principal (pourcentage)
K_y = Variation du rendement avec le stress hydrique (san unité) (Voir équation 16a, Stewart, 1981).

*Première coupe seulement

Les données à introduire dans le modèle sont les moyennes mensuelles à long terme de la température des taux de précipitation, du rayonnement solaire incident, de la vitesse du vent et de la tension de vapeur. Ces données proviennent soit de réseaux d'observation (Service de l'environnement atmosphérique du ministère de l'Environnement du Canada) ou ont été déduites de simples équations empiriques.

Les données normales représentant la moyenne de 30 années, (1941 à 1970) obtenues des stations climatiques, ont été interpolées par ordinateur pour former une grille quadrillée, de 1 290 sections égales, chacune des sections couvrant une superficie de 100 km sur 100 km. Les données climatiques pour chacune des sections de la grille étaient la précipitation, les températures moyenne, maximale et minimale de l'air (ajustées au niveau de la mer), la tension de vapeur, la vitesse du vent et le rayonnement solaire incident. Les auteurs on alors déduit des valeurs de la grille des données climatiques sur chacune des 755 unités cartographiques de la Carte des sols du Canada (Clayton et al., 1977). Pour cela, ils ont superposé la grille sur la Carte des sols, au 1:5M, et ont estimé la superficie de chacune des unités englobées dans les sections de la grille. A partir de ces résultats, ils ont déduit les données climatiques de base pour chaque unité cartographique par une simple méthode de pondération (Stewart, 1981).

Dans certains cas, les auteurs on jugé que les données de la grille ne décrivaient pas adéquatement le climat de diverses unités cartographiques (c'est-à-dire, les régions montagneuses de la Colombie-Britannique). Ils ont alors calculé une moyenne des données fournies par plusieurs stations situées sur le territoire de l'unité cartographique et se sont servis des données de la grille pour les unités qui n'ont aucune station climatique. Dans certains cas, l'interpolation des données des stations aux sections de 100 km^2 de la grille constitue une limite, car certains micro-climats peuvent se trouver absorbés dans une moyenne (le cas de la vallée d'Annapolis).

2.3 Modifications des données de départ pour simuler les fluctuations climatiques

Les auteurs de la présente étude ont simulé les fluctuations climatiques en faisant varier la température et le taux de précipitation de deux façons. Dans la première, il s'agit d'un climat caractérisé par une alternance temps chaud - temps froid/temps sec-temps humide, avec l'hypothèse que la durée de la période de végétation (PV) est la même qu'actuellement (c'est-à-dire, la normale pour 1941-1970) et qu'elle ne changera pas. Cette forme de variation des conditions climatiques, qu'ils désignent par "période de végétation fixe", est comparée au climat normal moyen (1941-1970) sur la figure 1(a). Pour simuler cette fluctuation, ils ont modifié les températures de la période "normale" de 1941-1970 en recourant à l'expression:

$$T_I = Tn_I + (Tmax - Tn_I) \sin (3{,}1416 \times I/PV), \qquad (4)$$

où: T_I est la température modifiée du jour I, calculée à partir d'une variation moyenne ΔT de la température pour la période de végétation; Tn_I est la température normale de la période 1941-1970 calculée pour le jour I, Tmax, la température maximale atteinte durant la période de végétation et

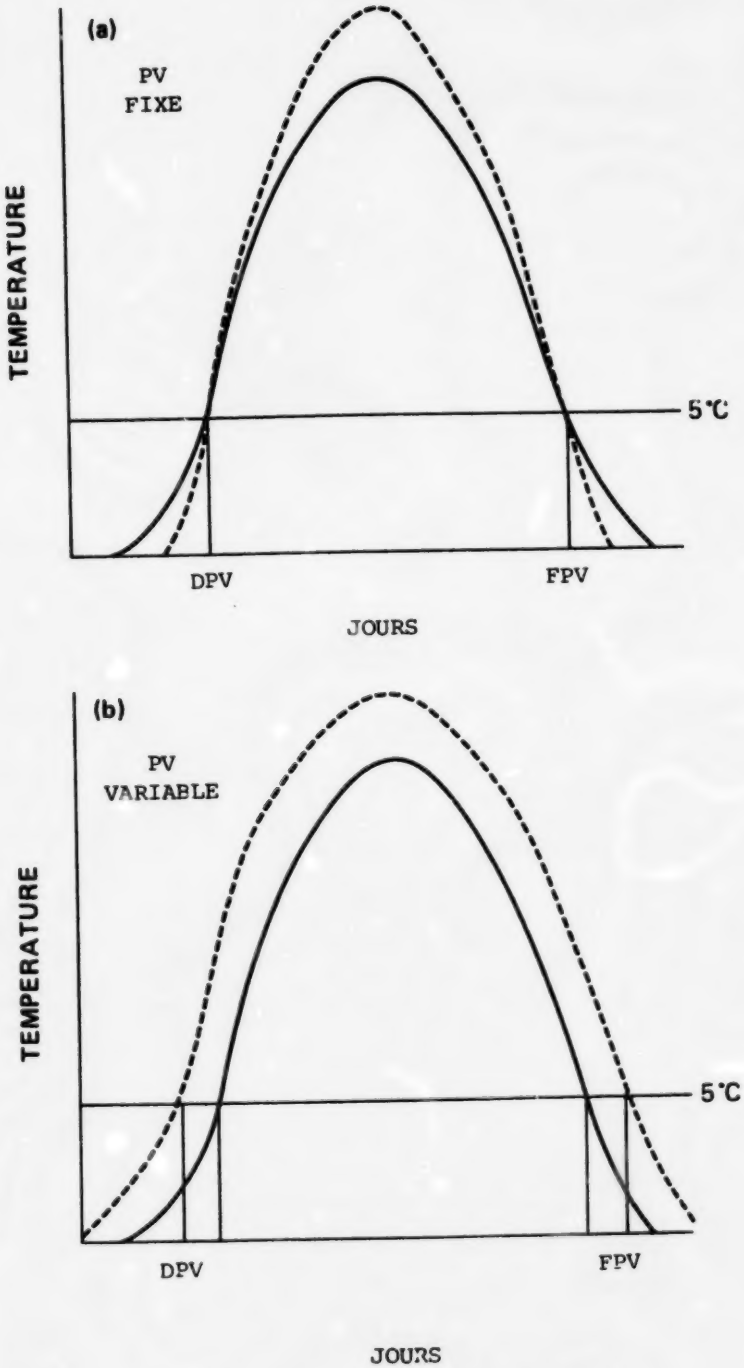

Figure 1. Exemple de deux types de scénarios utilisés pour les fluctuations de température: (a) PV fixe; (b) PV variable. La ligne continue (——) est la courbe des températures normales, tandis que le pointillé (---) représente les déviations par rapport à la normale.

calculée par la formule (Tmaxn + 1,571 Δ T), où Tmaxn est la température maximale des périodes de végétation "normales" (1941-1970).

Les auteurs ont simulé la deuxième forme de fluctuation climatique en ajustant toutes les températures mensuelles par Δ T, comme l'indique la figure 1b. Ce type de changement a donné lieu à une modification de la durée de la période de végétation et est désigné par "période de végétation variable".

Ils ont établi de la même façon des fluctuations du taux de précipitation pour les deux types de scénarios climatiques, c'est-à-dire en ajustant les normales mensuelles. Cela suppose qu'aucune variation majeure du mode de précipitation ne survient pendant la période de végétation et que toute modification est également répartie sur cette période. Ils ont procédé ainsi avec le taux de précipitation pour plus de simplicité, car il n'existe actuellement aucun moyen d'en prévoir les variations pendant la période de végétation.

Les valeurs mensuelle de la période normale 1941-1970 ont servi de données de base. Dans le scénario à période de végétation variable, les températures et les taux de précipitation ont été ajustés aux valeurs voulues, alors que pour toutes les autres données de départ, les chiffres "normaux" ont été conservés. Les valeurs quotidiennes de toutes les variables climatiques, le taux de précipitation excepté, ont été obtenues, par interpolation, avec la courbe de sinus de Brooks (1943). Les taux de précipitation mensuels ont été transformés en valeurs hebdomadaires et utilisés comme données de départ pour les semaines. Puis, les périodes de végétation moyennes ont été calculées en divisant la moyenne des données couvrant la période allant du début (DPV) à la fin de la période de végétation (FPV) par la durée de cette période (PV). La date du début de la période de végétation a été fixée au premier jour où la température minimale moyenne de l'air a dépassé 5 °C, au printemps, tandis qu celle de la fin a été celle où cette température est tombée en dessous de 5 °C, à l'automne.

Dans le scénario à période de végétation fixe, les données mensuelles et quotidiennes de la période normale de 1941-1970 ont permis de déduire les dates du début et de la fin de la période de végétation pour chaque unité cartographique. Les températures entre ces dates ont été ajustées à l'aide de l'équation (4).

Pour les deux types de fluctuation climatique, les auteurs ont estimé les rendements anticipés avec 22 combinaisons de température (variation de 3 °C à -3 ° C par rapport à la normale) et de taux de précipitation (60% à 140 % de la normale). Les divers scénarios climatiques sont décrits au tableau 2.

Dans l'interprétation des résultats des calculs à l'aide du modèle, il faut garder à l'esprit qu'on utilise des valeurs climatiques normales à long terme plutôt que les valeurs quotidiennes réelles. De plus, ce sont les moyennes de la période de végétation ainsi que les caractères phénologiques bruts des plantes qui ont été utilisés, de sorte que divers stades de croissance et les variations dans le mode de gestion (par exemple l'emploi d'engrais et de pesticides) ont été omis.

TABLEAU 2: Scénarios climatiques

Numéro du scénario	Changement de température Nombre de °C par rapport à la normale	Changement du taux de précipitation % de la normale
1	0	100
2	+3	60
3	+3	80
4	+3	100
5	+3	120
6	+3	140
7	+2	80
8	+2	100
9	+2	120
10	+1	80
11	+1	100
12	+1	120
13	-1	80
14	-1	100
15	-1	120
16	-2	80
17	-2	100
18	-2	120
19	-3	60
20	-3	80
21	-3	100
22	-3	120
23	-3	140

3. RESULTATS ET DISCUSSION

Pour la présente analyse, sept sites ont été choisis à travers le Canada (figure 2) pour déterminer l'effet de divers scénarios climatiques sur B_{ye}, dans différentes zones climatiques. Le tableau 3 présente pour chaque site la moyenne des données climatiques pour la période allant du 1er ,mai au 30 septembre.

Les figures 3 à 6 présentent les variations de B_{ye} par rapport à la période normale de 1941-1970 pour les scénarios choisis, dans le cas des céréales, des oléagineux, de la pomme de terre, des fourrages et du mais, avec des périodes de végétation fixe et variable. Les valeurs absolues de B_{ye} peuvent être déduites en additionnant ou en soustrayant la variation du rendement, donnée par les graphiques, des valeurs "normales" de B_{ye} énumérées au tableau 4. Les courbes de rendement obtenues pour les divers sites sont réduites à une seule courbe, lorsque le rendement s'écarte de moins de 0,5 t/ha par rapport à la moyenne (par exemple, figure 3b).

3.1 PERIODE DE VEGETATION FIXE

Avec une période de végétation fixe, les changements de température ne modifient pas les valeurs du début, de la fin et de la durée de la période de végétation pour un lieu donné. Ces paramètres sont fixés par les calculs relatifs à la période normale de 1941-1970 et paraissent au tableau 5, pour une durée de vététation variable, sans changement de température ($\Delta T = 0\ ^{o}C$). Lorsque la période de végétation dépasse le maximum limite fixé pour chaque culture dans le tableau 1, la période de végétation maximale a été utilisée dans le calcul du rendement.

3.1.1 Rendements estimés. Les résultats obtenus pour les céréales et les oléagineux sont souvent combinés, car les réactions au changement de climat sont les mêmes (figure 3). Le rendement tend à diminuer avec une augmentation de la température. Dans les régions plus sèches (par exemple, le sud de la Saskatchewan (1), la vallée de l'Okanagane (2)), les rendements sont plus sensibles à des modifications de la température que dans les régions plus humides (par exemple, la vallée d'Annapolis (6) et la ceinture d'argile du nord de l'Ontario (7)) en raison d'une augmentation du stress hydrique due à une élévation de température. Les variations de la température influent moins sur les valeurs de B_{ye} pour la ceinture d'argile du nord de l'Ontario (7).

Avec une variation de +3 ^{o}C, les rendements diminuent dans tous les sites au point qu'une augmentation de 40 % du taux de précipitation n'atténue pas les effets d'une hausse du stress hydrique (figure 3D). Avec une variation de -3 ^{o}C, les hausses de rendement se situent entre 1 et 2 t/ha au-dessus de la normale dans les régions plus sèches, lorsque les taux de précipitation sont supérieurs à la normale (figure 3E). Dans les régions plus humides, les rendements ne varient pas dans la gamme de taux de précipitation étudiée.

Les rendements de la pomme de terre (figure 4) déterminés à l'aide du modèle ont été semblables à ceux des céréales et des oléagineux. La figure 4 (A,B et C) montre que B_{ye} diminue dans tous les sites orsque les températures dépassent les valeurs normales et que les taux de précipitation se situent entre 80 et 120 % de la normale. Les rendements

Figure 2. Régions couvertes par l'étude.

TABLEAU 3: Données climatiques normales (1941-1970) pour les régions étudiées.

Numéro de la région	Région	Climat normal (mai-septembre)			
		T	P	K↓	EPT
1.	Sud de la Saskatchewan	13,9	227	20,6	600
2.	Vallée de l'Okanagane	15,8	151	20,6	542
3.	Prairie-Parc (Prince Albert, Saskatchewan)	13,6	249	18,7	520
4.	Sud de l'Ontario	17,0	371	19,2	517
5.	Région de Rivière de la Paix, en Alberta	12,6	250	18,0	456
6.	Vallée d'Annapolis en Nouvelle Ecosse	14,4	448	18,5	444
7.	Ceinture d'argile du nord de l'Ontario	13,3	428	17,7	425

T = Température moyenne de l'air (°C)
P = Précipitation totale (mm)
K↓ = Rayonnement solaire incident (MJ/m^2-jr)
EPT = Evapotranspiration potentielle totale (mm)

TABLEAU 4: Rendement en matière sèche (t/ha) estimé pour les conditions climatiques normales (1941-1970)[1]

Région**	Céréales	Oléagineux	Pomme de terre	Fourrages[2]	Mais[3]
1	1,7	1,6	2,9	4,4	0,0
2	2,2	1,7	3,8	4,0	3,0
3	2,5	2,5	4,2	4,9	0,0
4	3,6	3,2	6,8	5,2	5,4
5	2,8	3,1	4,8	5,4	0,0
6	4,1	3,8	7,8	5,3	0,0
7	3,8	3,7	6,0	6,1	0,0

[1]Les rendements en matière sèche ont été estimés en supposant une durée maximale de la période de végétation de n jours, où n=110, 120, 140, 75 et 130 jours pour les céréales, les oléagineux, la pomme de terre, les fourrages et le mais respectivement (voir le Tableau 5 pour les valeurs de la PV).

[2]Les rendements des fourrages n'ont été déterminés que pour la première coupe (PV=75 jours).

[3] Les rendement du mais grain ont été fixés à 0,0 dans les régions où le nombre d'unités thermiques mais est inférieur à 2 500, les plantes n'atteignant pas un degré de maturité satisfaisant.

**1=Sud de la Saskatchewan, 2=Vallée de l'Okanagane, 3=Prairie-parc, 4=Sud de l'Ontario, 5=Rivière de la Paix, 6=Vallée d'Annapolis, 7=Ceinture d'argile du nord de l'Ontario.

TABLEAU 5: Début (DPV), fin (FPV), durée de la période de végétation (PV), en jours, et nombre d'unités thermiques maïs (UTM) pour chaque scénario de fluctuation de température, avec une PV variable.

		Changement de température ΔT (°C)						
Région	Paramètre	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
Sud de la Sask.	DPV	20 juin	13 juin	6 juin	29 mai	23 mai	18 mai	13 mai
	FPV	22 août	28 août	1 sept	6 sept	12 sept	17 sept	22 sept
	PV	64	77	88	101	113	123	133
	UTM	1017	1294	1559	1865	2175	2470	2775
Vallée de l'Okan.	DPV	7 juin	29 mai	22 mai	14 mai	7 mai	29 avr	22 avr
	FPV	4 sept	11 sept	18 sept	25 sept	2 oct	9 oct	15 oct
	PV	90	106	120	135	149	164	177
	UTM	1493	1845	2192	2568	2945	3348	3739
Prairie-parc	DPV	20 juin	13 juin	6 juin	29 mai	23 mai	18 mai	13 mai
	FPV	22 août	28 août	2 sept	7 sept	12 sept	17 sept	23 sept
	PV	64	77	89	102	113	123	134
	UTM	987	1262	1541	1849	2148	2444	2764
Sud de l'Ont.	DPV	25 mai	19 mai	15 mai	9 mai	4 mai	26 apr	20 apr
	FPV	27 sept	3 oct	8 oct	13 oct	19 oct	24 oct	2 nov
	PV	126	138	147	158	169	182	197
	UTM	2232	2569	2886	3237	3597	3994	4422
Rivière de la Paix	DPV	28 juin	17 juin	9 juin	30 mai	23 mai	17 mai	12 mai
	FPV	14 août	22 août	29 août	4 sept	11 sept	17 sept	23 sep
	PV	47	67	82	98	112	124	135
	UTM	625	958	1260	1596	1931	2257	2583
Vallée d'Annap.	DPV	13 juin	6 juin	30 mai	24 mai	18 mai	12 mai	6 mai
	FPV	17 sept	23 sept	30 sept	7 oct	13 oct	20 oct	2 nov
	PV	97	110	124	137	149	162	181
	UTM	1443	1751	2088	2434	2786	3162	3607
Ceinture d'argile du nord de l'Ontario	DPV	19 juin	12 juin	6 juin	31 mai	27 mai	22 mai	17 mai
	FPV	25 août	1 sept	8 sept	15 sept	21 sept	1 oct	7 oct
	PV	68	82	95	108	118	133	144
	UTM	990	1279	1573	1883	2172	2528	2861

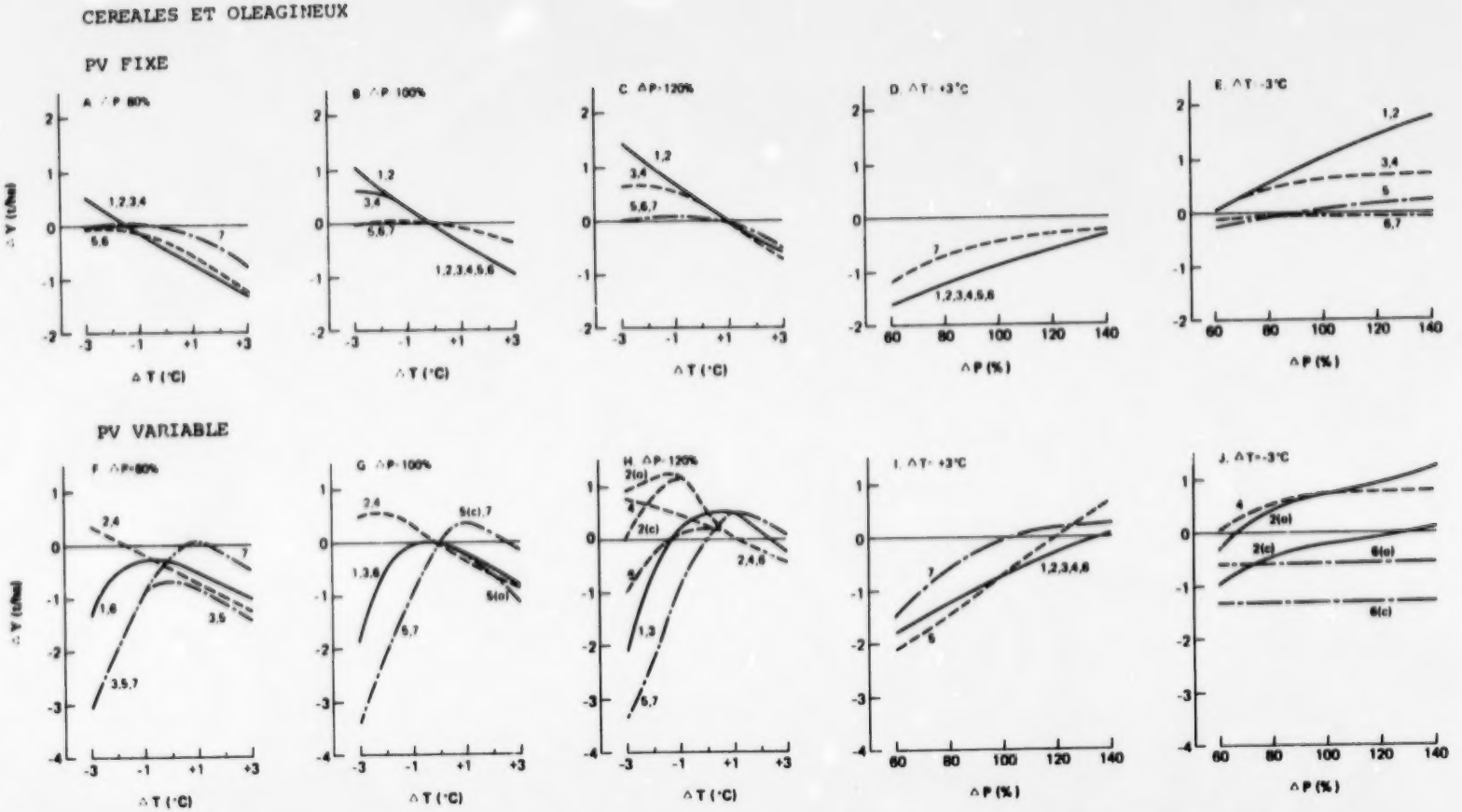

Figure 3. Variations des rendements estimés en matière sèche par rapport à la normale pour les céréales (C) et les oléagineux (O) avec une période de végétation fixe et une période variable. T = variation de la température (°C) par rapport à la normale: P = pourcentage des précipitations normales des régions sont: (1) Sud de la Sask.; (2) V. de l'Okanagane; (3) Prairie-parc; (4) Sud de l'Ont.; (5) Riv. de la Paix; (6) V. d'Annapolis; (7) Ceint. d'argile du nord de l'Ontario.

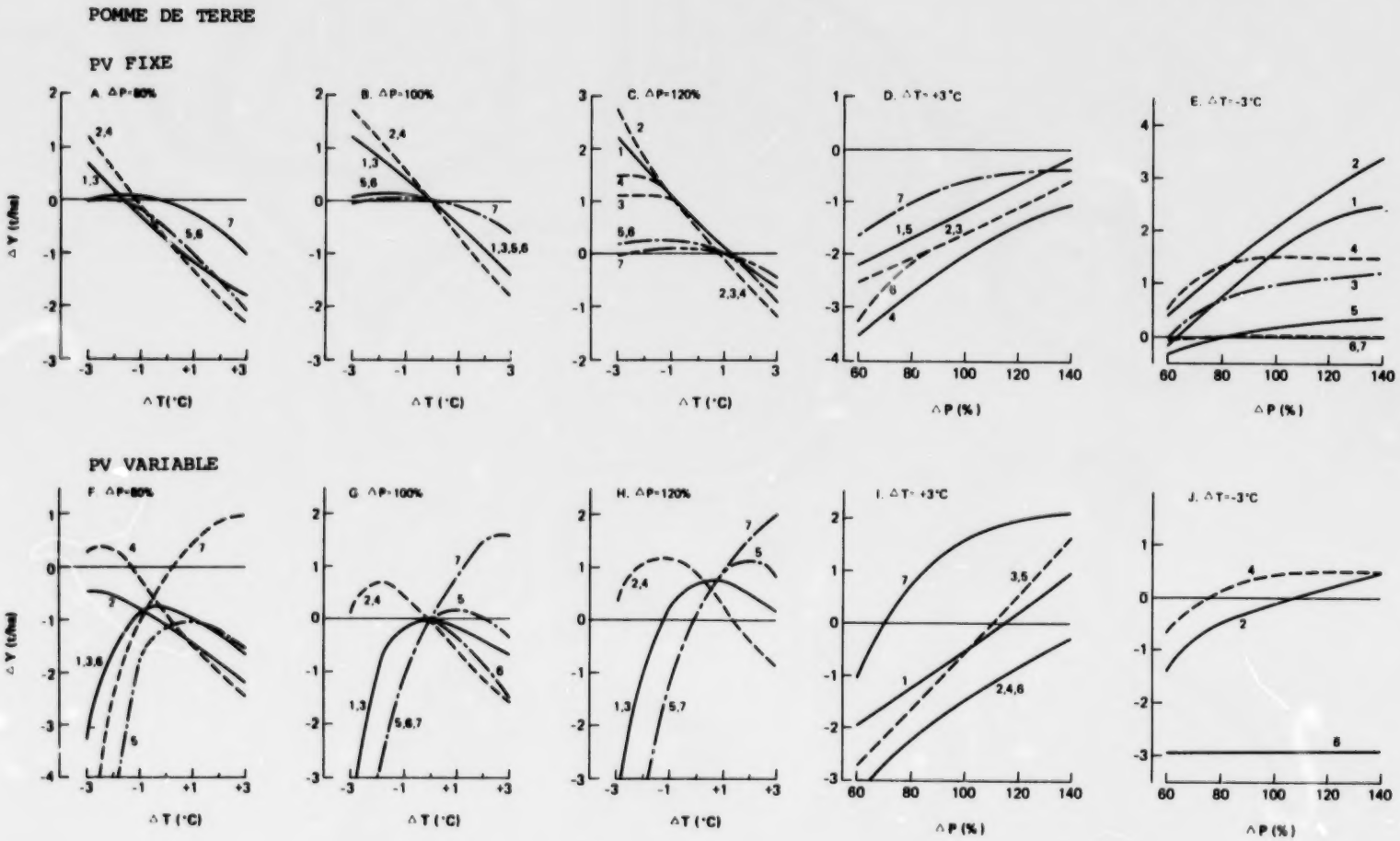

Figure 4. Variations des rendements estimés en matière sèche par rapport à la normale (ΔY) pour la pomme de terre avec une période de végétation fixe et une période variable. Les régions sont les mêmes qu'à la Figure 3.

dans la ceinture d'argile du nord de l'Ontario (7) sont les moins touchés par une hausse de température. Dans le sud de la Saskatchewan (1), la vallée de l'Okanagane (2), la prairie-parc (3) et le sud de l'Ontario (4), les rendements augmentent lorsque la température tombe sous la normale. Des températures inférieures à la normale n'ont que peu d'effets sur les rendements à la Rivière de la Paix (5), dans la vallée d'Annapolis (6) ou dans la ceinture d'argile du nord de l'Ontario (7).

Les résultats obtenus pour les fourrages (figure 5) ne s'appliquent qu'à la première coupe (durée maximale de la période de végétation, de 75 jours). Les rendements, pour une période fixe, sont semblables à ceux des céréales et des oléagineux. Pour les températures inférieures à la normale, les valeurs de B_{ye} se situent habituellement à 0,5 t/ha des rendements de la période normale, sauf dans le sud de la Saskatchewan (1) et dans la vallée de l'Okanagane (2), où les rendements ont augmenté d'environ 1 t/ha à -3 °C lorsque les taux de précipitation étaient d'au moins 100 % du taux normal. À -3 °C, les rendements n'ont pratiquement pas changé avec les variations du taux de précipitation dans le sud de l'Ontario (4), la vallée d'Annapolis (6) et la ceinture d'argile du nord de l'Ontario (7) (figure 5E). Dans la plupart des autres sites, les rendements ont augmenté graduellement de moins de 1 t/ha, avec des températures inférieures à la normale et un taux de précipitation à 60 % de la normale, à 0,5 - 1,0 t/ha, avec des températures supérieures à la normale et un taux de précipitation de 140 % de la normale.

Les résultats pour le mais (figure 6) ne sont présentés que pour les régions où le mais grain peut atteindre la maturité avec, comme contrainte, 2 500 unités thermiques mais (UTM) sous un climat normal (c'est-à-dire, sud de l'Ontario (4) et vallée de l'Okanagane (2)), comme le montre le tableau 4. Le tableau 6 donne le nombre d'unités thermiques mais disponibles, pour chaque changement de température, avec une période de végétation fixe. Pour une variation de 1 °C de la température par rapport à la normale, le nombre d'unités thermiques mais disponibles varie de 139 à 243. Des températures inférieures à la normale influent davantage sur le nombre d'unités thermiques mais disponibles que des températures plus élevées. Par ailleurs, dans les régions où la période de végétation est courte (sud de la Saskatchewan (1), prairie-parc (3) et Rivière de la Paix (5)), le nombre d'unités thermiques mais varie moins facilement avec les changements de température que dans les régions à plus longue période de végétation (c'est-à-dire, la vallée de l'Okanagane (2), le sud de l'Ontario (4), et la vallée d'Annapolis (6)). En l'absence de variations de température, les rendements estimés pour la vallée d'Annapolis (6) ont été nuls, car la méthode d'interpolation des données climatiques donne une sous-estimation du nombre d'unités thermiques mais. Pour toutes les variations positives de température, la vallée d'Annapolis (2) est la seule région additionnelle qui présente un potentiel de production. Pour des températures inférieures à la normale, le sud de l'Ontario (4) est la seule région qui jouit de possibilités de production du mais grain. Toutefois, les possibilités de cette région disparaissent lorsque les températures diminuent de plus de 3 °C par rapport à la normale.

Dans le scénario à période de végétation fixe, les rendements ont tendance à baisser lorsque les températures dépassent les valeurs normales, et que les taux de précipitation se situent à 80 et 100 % de la normale. Avec des taux de précipitation correspondant à 100 % et à 120 % de la

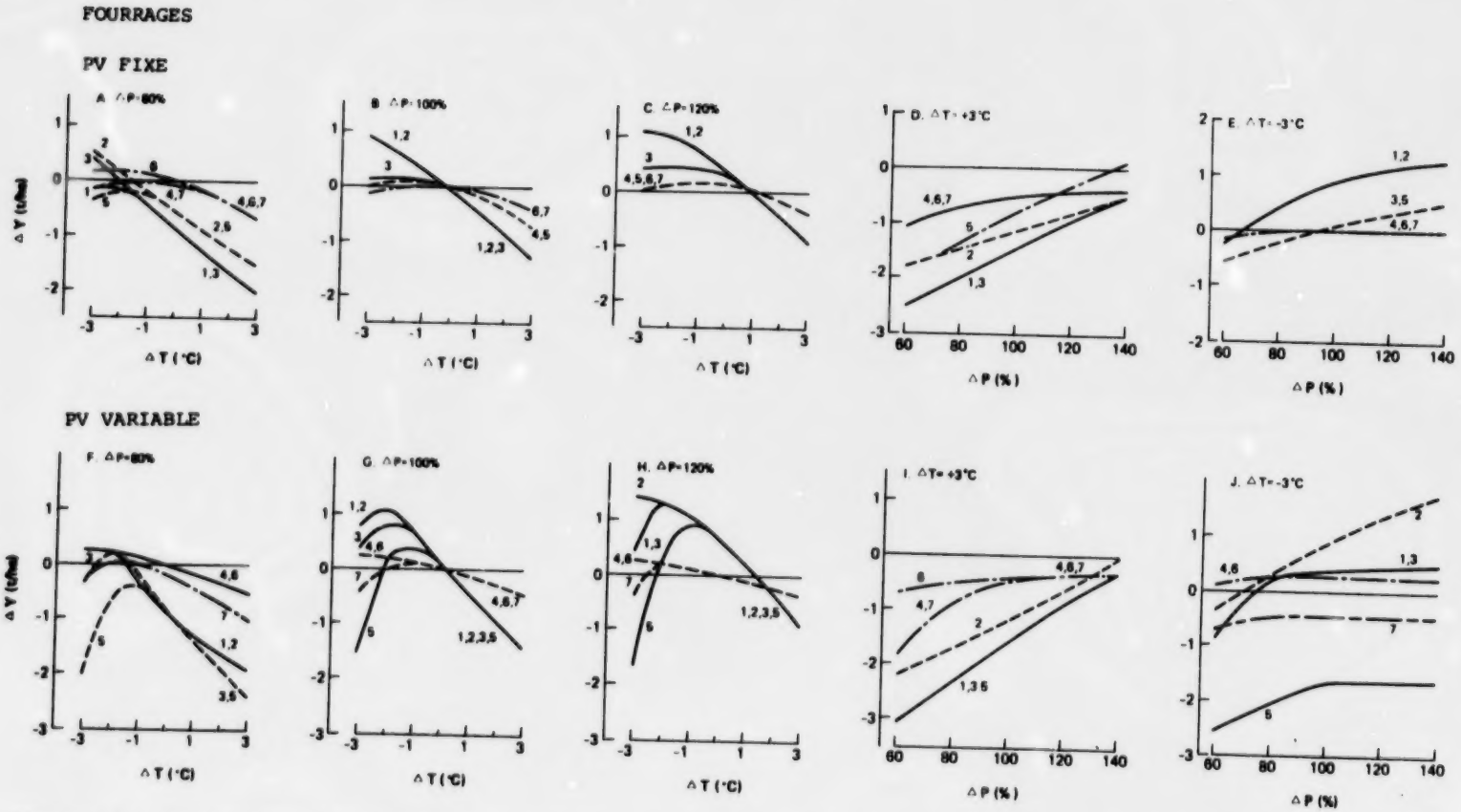

Figure 5. Variations des rendements estimés en matière sèche par rapport à la normale (ΔY) pour les fourrages avec une période de végétation fixe et une période variable. Les régions sont les mêmes qu'à la Figure 3.

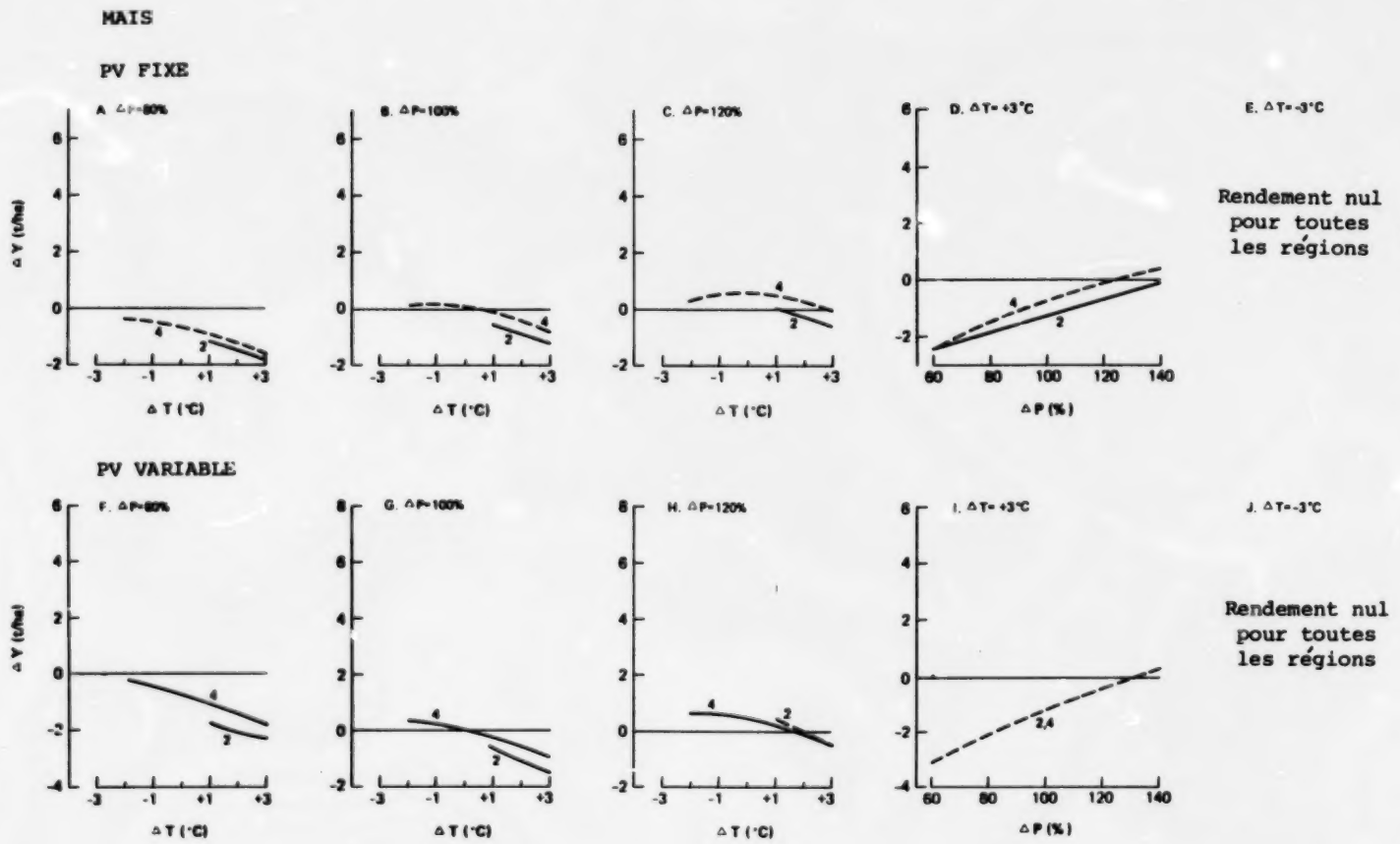

Figure 6. Variations des rendements estimés en matière sèche (ΔY) par rapport à la normale pour le maïs, avec une période de végétation fixe et une période variable. Les régions sont les mêmes qu'à la Figure 3.

TABLEAU 6: Nombre d'unités thermiques mais (UTM) pour chaque scénario de fluctuation de température, avec une PV fixe*.

	Changement de température ΔT (°C)						
Région**	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	1395 (-470)	1560 (-305)	1717 (-148)	1865	2004 (+139)	2135 (+270)	2258 (+393)
2	1952 (-616)	2169 (-399)	2374 (-194)	2568	2750 (+182)	2921 (+353)	3081 (+513)
3	1358 (-491)	1530 (-319)	1694 (-155)	1849	1996 (+147)	2134 (+285)	2263 (+414)
4	2468 (-768)	2737 (-499)	2993 (-243)	3236	3466 (+230)	3682 (+446)	3885 (+649)
5	1084 (-512)	1263 (-333)	1434 (-162)	1596	1750 (+154)	1896 (+300)	2034 (+438)
6	1701 (-732)	1956 (-477)	2201 (-232)	2433	2655 (+222)	2864 (+431)	3062 (+629)
7	1332 (-551)	1525 (-358)	1708 (-175)	1883	2048 (+165)	2204 (+321)	2351 (+468)

*Le début, la fin et la durée de la période de végétation, avec une PV fixe, sont les mêmes que dans le scénario à variation de température nulle, avec une PV variable (Tableau 4), pour tous les changements de températures.
Les chiffres entre parenthèses indiquent la variation par rapport à la normale.

**1=Sud de la Saskatchewan, 2=Vallée de l'Okangane, 3=Prairie-parc, 4=Sud de l'Ontario, 5=Rivière de la Paix, 6=Vallée d'Annapolis, 7=Ceinture d'argile du nord de l'Ontario.

normale, les rendements en maïs dans le sud de l'Ontario (4) tendent à atteindre un maximum aux températures de la période normale de 1941-1970. Ces rendements diminuent légèrement à des températures supérieures et inférieures, bien que très peu (moins de 0,25 t/ha pour chaque variation de 1 °C). La plus forte baisse de rendement du maïs survient lorsque l'élévation de température s'accompagne d'une baisse des précipitations (figure 6A). La baisse maximale de rendement (2,5 t/ha) survient lorsque la température varie de +3 °C et que le taux de précipitation se situe à 60 % de la normale.

3.1.2 Résumé. De tous les scénarios climatiques étudiés, ceux qui ont le plus de chances de se concrétiser au cours des prochaines décennies sont probablement ceux où les températures varient de ±1°C et les précipitations de 20 % par rapport aux normales. Les variations correspondantes du rendement estimé sont résumées au tableau 7. Les variations de rendement, pour des taux de précipitation à 80 et à 120 % de la normale, sans aucune modification de la température, ont été estimées par interpolation linéaire des valeurs correspondant à des températures de ±1 °C, car les rendements n'ont pas été calculés pour ces cas.

Une variation de -1 °C de la température entraîne habituellement une hausse de moins de 0,5 t/ha des rendements. Pratiquement aucune variation de rendement ne survient dans les régions plus froides ou plus humides (Rivière de la Paix (5), vallée d'Annapolis (6), ceinture d'argile du nord de l'Ontario (7)). Les hausses de rendement ont été les plus élevées dans le cas de la pomme de terre et les plus faibles dans le cas des fourrages. La forte réduction des rendements du maïs dans la vallée de l'Okanagane (2) résulte d'une baisse totale du nombre d'unités thermiques maïs sous le seuil de 2 500, toute possibilité de production (tableau 7) disparaissant ainsi.

Une hausse de +1 °C de la température provoque une diminution des rendements, de l'ordre de 0,3 à 0,6 t/ha principalement. La ceinture d'argile du nord de l'Ontario (7) a été la seule région où une augmentation de +1 °C de la température n'a pas modifié le rendement. La forte augmentation du rendement en maïs grain dans la vallée d'Annapolis (6) est due au fait que le seuil de 2 500 unités thermiques maïs a été atteint.

Une baisse de 20 % du taux de précipitation entraîne une diminution de 0,3 à 0,8 t/ha des rendements de la plupart des cultures et dans la plupart des régions. Toutefois, dans la ceinture d'argile du nord de l'Ontario (7), les rendements estimés n'ont diminué que de 0,1 t/ha.

Une hausse de 20 % des précipitations n'a provoqué aucune variation appréciable des rendements dans la vallée d'Annapolis (6) et dans la ceinture d'argile du nord de l'Ontario (7)), mais a donné lieu à une légère augmentation de 0,6 t/ha, ou moins, dans toutes les autres régions. C'est le rendement de la pomme de terre qui a connu les plus fortes augmentations.

3.2 PERIODE DE VEGETATION VARIABLE

Le tableau 5 présente les variations des dates du début et de la fin de la période de végétation, ainsi que de sa durée, avec une période de végétation variable, dans chacun des scénarios de variation de température

TABLEAU 7: Variations du rendement estimé en matière sèche (B_{ye}) pour chaque variation de ±1°C et de ±20% du taux de précipitation, avec une PV fixe*.

Région**	ΔRendement (t/ha)					ΔRendement (t/ha)				
	Ce	O	P	F	Ms	Ce	O	P	F	Ms
	A. ΔT=-1°C P=100%					B. ΔT=+1°C P=100%				
1	0,2	0,3	0,4	0,2	-	-0,3	-0,3	-0,4	-0,7	-
2	0,2	0,2	0,5	0,2	3,0	-0,3	-0,4	-0,7	-0,5	-0,6
3	0,2	0,3	0,4	0,1	-	-0,4	-0,4	-0,6	-0,5	-
4	0,3	0,4	0,7	0,2	0,2	-0,3	-0,3	-0,7	-0,1	-0,2
5	0,1	0,1	0,1	0,0	-	-0,3	-0,3	-0,5	-0,2	-
6	0,1	0,1	0,1	0,0	-	-0,3	-0,3	-0,5	-0,1	5,6
7	0,0	0,0	0,1	0,0	-	0,0	0,0	0,0	0,0	-
	C. P=80% ΔT=0					D. P=120% ΔT=0				
1	-0,4	-0,5	-0,6	-0,9	-	0,4	0,4	0,6	0,3	-
2	-0,5	-0,5	-0,7	-0,5	-	0,3	0,3	0,5	0,3	-
3	-0,5	-0,6	-0,8	-0,8	-	0,3	0,4	0,5	0,2	-
4	-0,3	-0,4	-0,7	0,0	-0,7	0,2	0,3	0,5	0,0	0,5
5	-0,4	-0,5	-0,7	-0,5	-	0,1	0,2	0,2	0,3	-
6	-0,2	-0,3	-0,5	-0,1	-	0,0	0,0	0,0	0,0	-
7	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-	0,0	0,0	0,0	0,0	-

*Les variations du rendement avec le taux de précipitation, lorsque ΔT=0, ont été estimées par interpolation des valeurs des ΔY à ±1°C.

Ce = Céréales, O = oléagineaux, P = Pomme de terre, F = Fourrages, Ms = Mais

**1=Sud de la Saskatchewan, 2=Vallée de l'Okanagane, 3=Prairie-parc, 4=Sud de l'Ontario, 5=Rivière de la Paix, 6=Vallée d'Annapolis, 7=Ceinture d'argile du nord de l'Ontario

et pour chacune des régions choisies. En moyenne, la période de végétation commence plus tard et se termine plus tôt, d'environ 6-7 jours, pour chaque diminution de 1 °C de la température de l'air, avec des différences pour certaines régions et certains scénarios de variation de températures. Par exemple, dans la région de la Rivière de la Paix (5), la différence entre les dates du début de la période de végétation dans les scénarios à +3 °C et +2 °C est de 5 jours comparativement à 11 jours pour les scénarios à -2 °C et de -3 °C. La durée de la période de végétation varie en moyenne de 12 à 15 jours pour chaque variation de 1 °C de la température, bien qu'elle ait varié de 9 à 20 jours dans la gamme de scénarios choisis. L'effect des variations de température sur cette durée a été plus accentué dans la vallée de l'Okanagane (2) et dans la région de la Rivière de la Paix (5) (de 14,5 jours/°C en moyenne) et moins considérable dans le sud de la Saskatchewan (1), le sud de l'Ontario (4) et la prairie-parc (3) (d'environ 11,7 jours/°C en moyenne).

La variation de la durée de végétation due à des changements de température exerce un effet notable sur le rendement estimé en matière sèche, particulièrement dans les régions où les pèriodes de végétation sont déjà courtes (p. ex., dans la région de la Rivière de la Paix (5) et dans la ceinture d'argile du nord de l'Ontario (7)).

Il est à noter que les paramètres du début, de la fin et de la durée de la période de végétation du tableau 5 sont déduits des données climatiques sur chaque région. Pour le calcul des rendements, une limite maximale a été fixée pour la durée, pour chacune des cultures, comme le montre le tableau 1. La période de végétation climatique a été utilisée dans le modèle de calcul du rendement, sauf lorsqu'elle dépassait ces maximums.

3.2.1 Rendements des céréales et des oléagineux. Une baisse de la température de l'air a entraîné une brusque réduction des rendements des céréales et des oléagineux dans le sud de la Saskatchewan (1), dans la prairie-parc (3), à Rivière de la Paix (5) et dans la ceinture d'argile du nord de l'Ontario (7) (figures 3F, G et H). Cette brusque réduction de B_{ye} est en partie attribuable à un imporant amenuisement de la durée de végétation. Sous le climat plus chaud du sud de l'Ontario (4) et de la vallée de l'Okanagane (2), les valeurs de Bye tendent à dépasser les valeurs normales lorsque les températures tombent en-dessous de la normale. Dans ces région, la hausse du rendement estimé peut être attribuée à une diminution du stress hydrique aux températures plus froides, à condition que les précipitations ne changent pas.

Avec des températures supérieures à la normale et aucune variation des précipitations, les rendements baissent en-dessous des valeurs normales ans toutes les régions, sauf dans la ceinture d'argile du nord de l'Ontario (7). Les résultats révèlent qu'une augmentation du stress hydrique, aux plus hatues températures, exerce sur les rendements estimés un effet négatif plus important que l'effet bénéfique d'un allongement de la période de végétation. Dans les regions à plus courte période de végétation (p. ex., la prairie-parc (3), Riviève de la Paix (5) et la ceinture d'argile du nord de l'Ontario (7)), les rendements atteignent un maximum lorsque la température varie de près de 0 à +1 °C et que les précipitations atteignent entre 80 et 120% de la normale. Dans les régions à plus longue durée de

végétation (p. ex., la vallée de l'Okanagane (2), le sud de l'Ontario (4)), le rendement maximal a été habituellement atteint lorsque les températures ont diminué de -1 ou de -2 °C (figures 3G et H) ou lorsqu'elles n'ont pas varié (figure 3F).

L'effet négatif sur le rendement d'une variation de +3 °C de la température est complètement neutralisé par une hausse du taux de précipitation de 40 % au-dessous de la normale (figure 3I). Pour une variation de -3 °C de la température, aucun rendement n'est indiqué pour le sud de la Saskatchewan (1), la prairie-parc (3), Rivière de la Paix (5) et la ceinture d'argile du nord de l'Ontario (7).

3.2.2 Rendement de la pomme de terre. Le scénario à période de végétation variable laisse prévoir une brusque réduction du B_{ye} de la pomme de terre lorsque les températures diminuent au-dessous des valeurs normales (figure 4), dans toutes les régions, sauf les plus chaudes (vallée de l'Okanagane (2) et sud de l'Ontario (4)). Les tendances ont été semblables à celles des céréales et des oléagineux, bien que les variations du rendement aient été de beaucoup plus élevées. La réduction rapide du rendement est principalement attribuable à la variation de la durée de la période de végétation. Les rendements maximaux sont atteints lorsque la température vaire de 0 à +1 °C sauf dans la ceinture d'argile du nord de l'Ontario (7) où B_{ye} continue à croître jusqu'à ce que la hausse atteigne +3 °C.

Avec des variations de température de -3 °C, seule la vallée de l'Okanagane (2), le sud de l'Ontario (4) et la vallée d'Annapolis (6) ont un certain potentiel de rendement (figure 4J), et seules les régions les plus chaudes (vallée de l'Okanagane (2) et sud de l'Ontario (4) réagissent aux changements de taux de précipitation.

3.2.3 Rendement des fourrages. Dans le cas des fourrages, les variations de B_{ye} tendent vers un maximum dans la plupart des régions lorsque les températures baissent d'au moins 2 °C par rapport à la normale (figures 5F, G et H), bien que ces modifications du rendement aient été de beaucoup plus faibles que pour les céréales, les oléagineux et la pomme de terre. Aux températures inférieures à la normale, les rendements tendent à demeurer au-dessus des valeurs normales lorsque les précipitations oscillent entre 100 % et 120 % de la normale. L'effet moindre des basses températures sur les rendements des fourrages, par rapport à d'autres cultures, est probablement dû à la plus courte durée de végétation nécessaire (maximum 75 jours) à la première coupe de fourrages.

La réaction du rendement à une augmentation du taux de précipitation (figures 5I et J) a été la même que pour d'autres cultures. Elle a été plus forte aux plus hautes températures (+3 °C) qu'aux plus basses (-3 °C) dans le sud de la Saskatchewan (1), la prairie-parc (3), le sud de l'Ontario (4), à Rivière de la Paix (5) et dans la ceinture d'argile du nord de l'Ontario (7). Les variations du taux de précipitation n'ont eu pratiquement aucun effet sur les rendements lorsque la variation de la température était de -3 °C dans les régions les plus humides (sud de l'Ontario (4), vallée d'Annapolis (6), ceinture d'argile du nord de l'Ontario (7)). La vallée de l'Okanagane (2) a été la seule région où les rendements ont continué à croître lorsque les précipitations ont augmenté à 140 % de la normale, avec un changement de température de -3 °C.

3.2.4 Rendement du mais. Le tableau 5 montre le nombre d'unités thermiques mais disponibles pour chacun des scénarios de température étudiés. En moyenne, un changement de 1 °C entraîne une variation d'environ 300-365 unités thermiques mais. Ces valeurs sont quelque peu supérieures lorsque les températures dépassent la normale, dans les régions plus chaudes, que lorsque les températures sont inférieures à la normale, dans les régions plus froides. Si on accepte l'hypothèse que le mais grain ne peut atteindre la maturité que dans les régions où le nombre d'unités thermiques mais disponibles est d'au moins 2 500, on peut affirmer qu'une diminution de 1 °C de la température moyenne éliminerait toute possibilité de production du mais grain dans toutes les régions auf le sud de l'Ontario (4), comme le montre le tableau 6. Réciproquement, des possibilités de production du mais grain prendraient naissance dans la vallée d'Annapolis (6) si la température moyenne augmentait de 1 °C, dans la ceinture d'argile du nord de l'Ontario (7) si elle augmentait de 2 °C, et dans les autres régions (sud de la Saskatchewan (1), prairie-parc (3), Rivière de la Paix (5)) si elle augmentait de 3 °C. Comme on l'a dit précédemment, aucun potentiel de production du mais grain sous un climat normal n'est indiqué dans le cas de la vallée d'Annapolis (6), car le nombre d'unités thermiques mais disponibles dans cette région a été quelque peu sous-estimé en utilisant la base de données de la grille de 100 km^2.

Les tendances du rendement du mais paraissent à la figure 6. Elles se rapprochent beaucoup de celles que l'on a observées avec une période de végétation fixe. L'effet négatif d'une augmentation de +3 °C de la température sur le rendement n'a été neutralisé que par des précipitations dépassant 120 % de la normale. Les rendements du mais diminuent avec l'élévation de la température en rison d'une augmentation du stress hydrique. Ces baisses de rendement surviennent parce que la durée de végétation est fixée à une valeur maximale constante de 130 jours. Si on avait fait augmenter cette durée avec un réchauffement pour simuler la réaction des variétés à plus longue période de végétation, les rendements auraient peut-être augmenté.

3.2.5 Résumé. Une variation de -1 °C de la température entraîne une baisse des rendements de la plupart des cultures (sauf les fourrages) dans les régions froides, à plus courte période de végétation (tableau 8). Dans ces (Rivière de la Paix (5) et ceinture d'argile du nord de l'Ontario (7)), les rendements des céréales et de la pomme de terre ont baissé d'au moins 1 t/ha. Dans les régions plus chaudes (c. -à-d. la vallée de l'Okanagane (2)), les rendements ont augmenté jusqu'à 0,5 t/ha.

Une augmentation de +1 °C de la température entraîne en général une baisse des rendements de 0,5 t/ha, au moins. Dans les régions les plus froides (Rivière de la Paix (5), ceinture d'argile du nord de l'Ontario (7), les rendements de certaines cultures (céréales, pommes de terre) ont augmenté bien que rarement de plus de 0,5 t/ha.

Une baisse de 20 % du taux de précipitation entraîne une réduction des rendements de plus de 1 t/ha dans certains cas (p. ex., la pomme de terre dans la vallée d'Okanagane (2), la prairie-parc (3) et Rivière de la Paix (5)).

TABLEAU 8: Variations du rendement estimé en matière sèche (B_{ye}) pour un changement de température de ±1°C et de ±20% du taux de précipitation avec une PV variable*.

Région**	Δ Rendement (t/ha)					Δ Rendement (t/ha)				
	Ce	O	P	F	Ms	Ce	O	P	F	Ms
	A. ΔT=-1°C P=100%					B. ΔT=+1°C P=100%				
1	-0,3	0,3	-0,1	0,7	-	0,1	-0,2	-0,1	-0,5	-
2	0,5	0,5	0,3	0,5	-3,0	-0,4	-0,4	-0,5	-0,5	-0,6
3	-0,4	0,2	-0,2	0,6	-	0,1	-0,3	-0,2	-0,5	-
4	0,3	0,3	0,2	0,1	0,3	-0,3	-0,3	-0,6	-0,1	-0,3
5	-1,3	-0,5	-1,5	0,4	-	0,4	-0,2	0,2	-0,4	-
6	0,1	0,1	-0,8	0,1	-	-0,2	-0,2	-0,2	-0,1	5,4
7	-1,0	-0,4	-1,0	0,0	-	0,5	0,3	0,7	-0,2	-
	C. P=80% Δ T=0					D. P=120% Δ T=0				
1	-0,5	-0,6	-0,8	-0,8	-	0,4	0,5	0,6	0,8	-
2	-0,6	-0,6	-1,1	-0,8	-	0,7	0,8	0,9	0,7	-
3	-0,8	-0,2	-1,1	-0,8	-	0,3	0,4	0,5	0,6	-
4	-0,4	-0,4	-0,8	-0,1	-0,7	0,2	0,3	0,5	0,1	0,5
5	-1,0	-1,0	-1,4	-0,8	-	-0,1	0,0	-0,1	0,5	-
6	-0,2	-0,2	-0,8	0,0	-	0,0	0,0	-0,3	0,0	-
7	-0,4	-0,2	-0,4	-0,3	-	-0,3	-0,1	-0,2	-0,1	-

*Les variations du rendement avec le taux de précipitation lorsque Δ T = 0 one été estimées par interpolation des valeurs de ΔY à ± 1°C.

Ce = Céréales, O = Oléagineux, P = Pomme de terre, F = Fourrages, Ms = Mais

**1=Sud de la Saskatchewan, 2=Vallée de l'Okanagane, 3=Prairie-parc, 4=Sud de l'Ontario, 5=Rivière de la Paix, 6=Vallée d'Annapolis, 7=Ceinture d'argile du nord de l'Ontario

Une augmentation de 20 % du taux de précipitation entraîne une hausse des rendements dans les régions plus sèches et plus chaudes (sud de la Saskatchewan (1), vallée de l'Okanagane (2), prairie-parc (3), ceinture d'argile du nord de l'Ontario (7)), mais dans la plupart des cas elle a un effet négatif ou nul sur le rendement dans le région de Rivière de la Paix (5), de la vallée d'Annapolis (6) et de la ceinture d'argile du nord de l'Ontario (7).

4. CONCLUSIONS

4.1 Effet d'un réchauffement

Les résultats de la présente étude permettent de conclure qu'une augmentation de la température, sans changement du taux de précipitation, entraînerait une baisse des rendements des cultures étudiées, dans la plupart des régions du Canada. Ces baisses de rendement sont dues à une augmentation du stress hydrique résultant d'une élévation des températures.

Une baisse du taux de précipitation accentue l'effet négatif d'un réchauffement sur les rendements, alors qu'une augmentation au-dessus des valeurs normales l'atténue.

Les auteurs ont noté quelques exceptions à cette tendance. Par exemple, le rendement de la pomme de terre dans la ceinture d'argile du nord de l'Ontario (7) a augmenté avec l'allongement de la période de végétation dû à une hausse de la température (tableau 5, Fig. 4). Dans le cas du mais, les superficies des terres aptes à la production pourraient en s'étendre vers le nord de l'Ontario de 60 à 100 km pour chaque élévation de 1 °C de la température, dans les limites imposées par l'état du sol. De la même façon, les superficies des terres aptes à la production de mais grain pourraient s'étendre dans d'autres régions humides du Canada qui ne jouissent pas actuellement d'assez d'unités thermiques pour favoriser la maturation des mais hybrides connus.

4.2 Effet d'un refroissement

Les résultats indiquent qu'un refroidissement exerce divers effets sur le rendement estimé. Si la durée de la période de végétation ne change pas, les rendements estimés de toutes les cultures (le mais excepté) augmente dans les zones plus sèches et plus tièdes, avec des taux de précipitation normaux. Cet effet résulte peut-être d'une atténuation du stress hydrique. Réciproquement, dans les régions plus froides et plus humides, l'effet est faible ou inexistant.

Un raccourcissement de la période de végétation donne lieu à d'importantes baisses du rendement estimé pour toutes les cultures, sauf pour la première coupe des fourrages et dans toutes les régions sauf celles où cette période est déjà longue (c'est-à-dire, la vallée de l'Okanagane (2) et le sud de l'Ontario (4)).

Si on suppose que les besoins minimaux en unités thermiques mais sont de 2 500, une baisse de 1 °C de la température, accompagnée d'une réduction de la durée de végétation éliminerait le mais grain de toutes les

régions, sauf le sud de l'Ontario (4). Une baisse de 3 °C de la température éliminerait les possibilités de production du mais grain de toutes les régions du Canada.

4.3 Effet d'une variation du taux de précipitation

Les rendements tendent à augmenter avec le taux de précipitation. Ils varient en général de 0,5 à 0,8t/ha pour chaque variation de 20 % du taux de précipitation, aux températures normales. A une température de 3 °C inférieure à la normale, les rendements changent considérablement avec le taux de précipitation, seulement dans les régions plus sèches (c'est-à-dire, le sud de la Saskatchewan (1), la vallée de l'Okanagane (2)). Aux températures supérieures à la normale, les rendements sont fortement modifiées par les variations du taux de précipitation dans toutes les régions, bien que l'effet soit plus accentué dans les régions les plus sèches.

BIBLIOGRAPHIE

Brooks, C.E.P., 1943. Interpolation tables for daily values of meteorological elements. Q.J.R. Meteorol. Soc., 69(300), 160-162.

Clayton, J.S., W.A. Ehrlich, D.B. Cann, J.H. Day and I.B. Marshall, 1977 Soils of Canada. Vols. 1 and 2. Research Branch, Canada Department of Agriculture, Ottawa, 239 p.

Dumanski, J. and R.B. Stewart, 1981. Crop Production Potentials for Land Evaluation in Canada. Research Branch, Agriculture Canada, 80 p.

F.A.O., 1978. Report on the Agro-ecological zones project: Vol. 1. Methodology and results for Africa. World Soil Resources Report 48, F.A.O., Rome. 158 p.

Keeling, C.D., J.A. Adams Jr., C.A. Ekdahl Jr. and P.R. Guenther, 1976a. Atmospheric carbon dioxide variations at the South Pole. Tellus, 28(6), 552-564.

Keeling, C.D., R.B. Bacastow, A.E. Bainbridge, C.A. Ekdahl Jr., P.R. Guenther and L.S. Waterman, 1976b. Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii. Tellus, 28(6) 538-551.

Manabe, S. and R.T. Wetherald, 1975. The effects of doubling the CO_2 concentration on the climate of a general circulation model. J. Atmos. Sci., 32, 3-15.

Manabe, S. and R.W. Wetherald, 1980. On the distribution of climate change resulting from an increase in CO_2 content of the atmosphere. J. Atmos. Sci., 37, 99-118.

Newman, J.E., 1980. Climate change impacts on the growing season of the North American corn belt. Biometeorology 7, Part 2:128-142.

Plass, G.N., 1956. Effect of carbon dioxide variations on climate. Am. J. Phys., 24, 376-387.

Schneider, S.H., 1975. On the carbon dioxide-climate confusion. J. Atmos. Sci., 32, 2060-2065.

Seller, W.D., 1973. A new global climatic model. J. Appl. Meteorol., 12(2), 241-254.

Sionit, N., H. Hellmers and B.R. Strain, 1980. Growth and yield of wheat under CO_2 enrichment and water stress. Crop Sci., 20, 687-690.

Stewart, R.B., 1981. Modeling methodology for assessing crop production potentials in Canada. Tech. Bull. 96, Research Branch, Agriculture Canada, Ottawa, 29 p.

Wit, C.T. de, 1965. Photosynthesis of leaf canopies. Agricultural Research Report 663. Centre for Agricultural Publications and Documentation, Wageningen, 57 p.

FACTEURS DE CONVERSION

Unité métrique	Facteur approximatif de conversion	Donne
LINÉAIRE		
millimètre (mm)	× 0,04	pouce
centimètre (cm)	× 0,39	pouce
mètre (m)	× 3,28	pieds
kilomètre (km)	× 0,62	mille
SUPERFICIE		
centimètre carré (cm^2)	× 0,15	pouce carré
mètre carré (m^2)	× 1,2	verges carrées
kilomètre carré (km^2)	× 0,39	mille carré
hectare (ha)	× 2,5	acres
VOLUME		
centimètre cube (cm^3)	× 0,06	pouce cube
mètre cube (m^3)	× 35,31	pieds cubes
mètre cube (m^3)	× 1,31	verges cubes
CAPACITÉ		
litre (L)	× 0,035	pied cube
hectolitre (hL)	× 22	gallons
hectolitre (hL)	× 2,5	boisseaux
POIDS		
gramme (g)	× 0,04	once
kilogramme (kg)	× 2,2	livres
tonne (t)	× 1,1	tonnes courtes
AGRICOLE		
litres à l'hectare (L/ha)	× 0,089	gallons à l'acre
litres à l'hectare (L/ha)	× 0,357	pintes à l'acre
litres à l'hectare (L/ha)	× 0,71	chopines à l'acre
millilitres à l'hectare (mL/ha)	× 0,014	onces liquides à l'acre
tonnes à l'hectare (t/ha)	× 0,45	tonnes à l'acre
kilogrammes à l'hectare (kg/ha)	× 0,89	livres à l'acre
grammes à l'hectare (g/ha)	× 0,014	onces à l'acre
plants à l'hectare (plants/ha)	× 0,405	plants à l'acre